T.M
(043) 62
B 440
2023

TESIS CARRERA DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA

MITIGACIÓN DE INTERFERENCIA WIFI EN RADAR METEOROLÓGICO A PARTIR DE SU EFECTO SOBRE LA VELOCIDAD DOPPLER

Ing. David Ezequiel Benoit
Maestrando

Dr. Juan Pablo Pascual
Director

Mgter. Jorge Cogo
Co-director

Miembros del Jurado
Dr. Martín Hurtado (INVAP SE.)
Dr. Isidoro Vaquila (INVAP SE.)
Dr. Horacio Arnaldi (CNEA)

31 de Marzo de 2023

Departamento de Ingeniería en Telecomunicaciones
Centro Atómico Bariloche

Instituto Balseiro
Universidad Nacional de Cuyo
Comisión Nacional de Energía Atómica
Argentina

(Biblioteca Leo Falicov CAB-IB)

Inventario 24744
12/04/2023
Biblioteca Leo Falicov

A mi abuelo Lito

Índice de contenidos

Índice de figuras

Índice de tablas

Índice de Siglas

CPI Coherent Processing Interval - *Intervalo de procesamiento coherente*

DEP Densidad Espectral de Potencia

DFS Dynamic Frequency Selection - *Selección Dinámica de Frecuencia*

FDP Función de Densidad de Probabilidad

IEEE Institute of Electrical Electronics Engineers - *Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos*

ISR Interference to Signal Ratio - *Relación interferencia a señal*

ITU International Telecommunication Union - *Unión Internacional de Telecomunicaciones*

PA Proceso Aleatorio

PPP Pulse-Pair Processing - *Procesamiento por pares de pulsos*

PPI Plan Position Indicator - *Indicador plano de posición*

PRF Pulse Repetition Frequency - *Frecuencia de repetición de pulsos*

PRI Pulse Repetition Interval - *Intervalo de repetición de pulsos*

RLAN Restricted Local Area Network - *Red de Área Local Restringida*

RMA Radar Meteorológico Argentino

RMSE Root Mean Square Error - *Raíz del error cuadrático medio*

SINARAME Sistema Nacional de Radares Meteorológicos

SNR Signal to Noise Ratio - *Relación señal a ruido*

VA Variable Aleatoria

WLAN Wireless Local Area Network - *Red de Área Local Inalámbrica*

Resumen

En esta tesis se presenta una técnica innovadora para detectar de manera automática la interferencia originada por sistemas inalámbricos WLAN/RLAN, basados en el estándar IEEE 802.11, que afecta a los radares meteorológicos, a partir de su efecto sobre el observable *velocidad Doppler media*. El trabajo se circunscribe al modo de operación denominado de intervalo de repetición de pulsos (PRI) uniforme, que es uno de los más ampliamente utilizados por estos radares.

En primer lugar, se comienza con un análisis teórico, para lo cual se definen modelos de señal simplificados para el fenómeno meteorológico y la interferencia, y se considera el estimador de velocidad por procesamiento de pares de pulsos (PPP). El desarrollo analítico muestra que el efecto de la interferencia sobre la velocidad se manifiesta como un salto respecto de su valor igual en módulo a la velocidad máxima no ambigua. Por lo tanto, el siguiente paso del estudio analítico es el calculo de probabilidad de que se produzca un salto de velocidad. Utilizando un modelo de señal más realista para el objetivo meteorológico, se llevan a cabo simulaciones numéricas con el fin de evaluar la probabilidad de ocurrencia de estos saltos de velocidad. Esto lleva a la necesidad de definir umbrales para determinar si el salto ocurre o no, para lo cual se analizan dos métodos diferentes: uno basado en una prueba que se basa en evaluar el comportamiento gaussiano de los estimados de velocidad, y otro que consiste en simplemente tomar valores fijos para los umbrales. Los resultados demuestran que la probabilidad de salto presenta un comportamiento similar para ambos modelos de señal.

A continuación, se desarrolla un detector de interferencia que se basa en el efecto de salto de velocidad observado. Se describe el algoritmo propuesto y se analiza su comportamiento para un caso de prueba. Para relevar el desempeño del detector, se realizan una serie de simulaciones numéricas considerando variaciones estadísticas del fenómeno meteorológico, intensidad de señal interferente y de ruido. Como métricas de desempeño se consideran la probabilidad de falsa alarma y la probabilidad de detección.

Por último, se procesan mediciones reales de radar meteorológico provenientes de radares de la red Sistema Nacional de Radares Meteorológicos (SINARAME). Se evalúa el desempeño del detector de forma cuantitativa y cualitativa. Se propone una técnica simple de mitigación de la interferencia mediante el reemplazo del valor afectado por una aproximación a lo que sería el estimado para el caso sin interferencia. Se conclu-

ye que el detector propuesto es efectivo en diferentes situaciones de ancho espectral, aunque requiere una relativa alta intensidad de interferencia para operar.

Palabras clave: PROCESAMIENTO DE SEÑALES, RADAR METEOROLÓGICO, VELOCIDAD DOPPLER, INTERFERENCIA WIFI, DETECCIÓN, ESTIMACIÓN

Abstract

This thesis presents an innovative technique to automatically detect interference caused by WLAN/RLAN wireless systems based on the IEEE 802.11 standard, which affect weather radars, through its effect on the *mean Doppler velocity* observable. The work is focused on the operation mode called uniform pulse repetition interval (PRI), which is one of the most widely used by these radars.

Firstly, a theoretical analysis is conducted, for which simplified signal models are defined for the meteorological target and the interference, and the pulse-pair processing (PPP) velocity estimator is considered. The analytic derivation shows that the interference effect over the velocity is a velocity jump whose value is in modulus equal to the unambiguous velocity. The theoretical analysis next step is the calculus of the probability that a velocity jump occurs. Using a more realistic signal model for the meteorological target, numerical simulations are performed to evaluate the probability of occurrence of these velocity jumps. This leads to the need to define thresholds to determine whether the velocity jump occurs or not, for which two different methods are analyzed: one based on a test that evaluates the Gaussian behavior of the velocity estimates, and another that simply involves using fixed threshold values. The results demonstrate that the jump probability exhibits a similar behavior for both signal models.

Next, an interference detector based on the observed jump velocity effect is developed. The proposed algorithm is described, and its behavior is analyzed for a test case. To assess the performance of the detector, a series of numerical simulations is conducted varying the parameters of the statistical models of the meteorological target, of the interference signal and of the noise. The false alarm probability and the detection probability are used as performance metrics.

Finally, real weather radar measurements acquired by radars of the Sistema Nacional de Radares Meteorológicos (SINARAME) network are processed. The performance of the detector is evaluated both quantitatively and qualitatively. A simple interference mitigation technique is proposed, which involves replacing the affected velocity value by an approximation of its value would be in the absence of interference. It is concluded that the proposed detector is effective in different spectral width situations, although it requires a relatively high level of interference to operate.

Keywords: SIGNAL PROCESSING, WEATHER RADAR, DOPPLER VELOCITY, WIFI INTERFERENCE, DETECTION, ESTIMATION

Capítulo 1

Introducción

1.1. Marco Teórico

1.1.1. Contexto del problema

Los radares meteorológicos permiten el seguimiento detallado de los fenómenos meteorológicos en tiempo real en una amplia zona en torno a su sitio de emplazamiento. La información recolectada permite elaborar pronósticos, alertas meteorológicas y emisión de avisos a la población en situaciones de emergencia, lo que los convierte en herramientas fundamentales para la gestión de riesgos y protección de la población ante eventos climáticos adversos [1, 2].

INVAP SE ha desarrollado el Radar Meteorológico Argentino (RMA) [3], para monitorear el clima en Argentina. Este radar forma parte del Sistema Nacional de Radares Meteorológicos (SINARAME)[4] , creado por el Servicio Meteorológico Nacional y la subsecretaría de Recursos Hídricos para brindar información meteorológica a nivel nacional. Los RMA del SINARAME se encuentran distribuídos a lo largo y ancho del país y permiten así observar los fenómenos meteorológicos en gran parte del territorio argentino.

Los RMA son radares de doble polarización que operan en la banda C[1], particularmente, con una frecuencia de operación reconfigurable que varía entre 5,45 y 5,82 GHz.

En la operación de cualquier radar meteorológico pueden detectarse eventos de origen no meteorológico como migraciones de insectos y/o aves, la presencia de aerosoles o interferencias indeseadas.

Para el caso particular de los radares que operan en banda C la principal fuente de interferencia se debe a equipos de comunicaciones que operan en la misma banda del espectro [5], entre los cuales se encuentran como principal factor las redes inalámbricas

[1] Porción del espectro electromagnético que va desde los 4GHz a 8GHz.

de área local (WLAN/RLAN). Si bien en rigor no son exactamente lo mismo, se ha popularizado el término “wifi” para referirse a este tipo de redes[2].

Originalmente, las bandas de frecuencias de operación de los radares meteorológicos eran de uso exclusivo de estos sistemas. Sin embargo, en el año 2003 la ITU (Unión Internacional de Telecomunicaciones) habilitó la operación de redes inalámbricas en estas bandas de frecuencia [6]. Esta decisión surgió del aumento del tráfico inalámbrico y la consecuente necesidad de incrementar el espectro disponible, buscando la coexistencia con los radares meteorológicos.

Para evitar que las redes wifi interfiriesen a los radares, los equipos transmisores debían utilizar el protocolo DFS (Dynamic Frequency Selection), que fuerza a las redes wifi a cambiar automáticamente de canal y ajustarse a las frecuencias libres cuando se detecta la operación de un radar [6].

Sin embargo, en la práctica, se observa que el protocolo DFS no evita el problema de la interferencia, ya sea por fallas del propio protocolo implementado en los equipos de comunicación inalámbricos o bien porque los usuarios lo desactivan [7].

1.1.2. Motivación

En general, la etapa de procesamiento de señales en un radar meteorológico tiene como objetivo la obtención de productos observables utilizados por los meteorólogos para caracterizar los fenómenos atmosféricos, como los momentos espectrales[8] y las variables polarimétricas [9].

Ocasionalmente, estos productos se encuentran afectados en cierta medida por el efecto de las reflexiones de la propia señal transmitida en otros objetos que no son el objetivo meteorológico, como el denominado *clutter* terrestre [10], *clutter* biológico (insectos, aves) [11] y el *clutter* eólico (turbinas de molinos eólicos) [12]. Además, la presencia de señales interferentes como las debidas a las transmisiones wifi, degrada la calidad de estos productos meteorológicos, lo que impacta negativamente en la posterior toma de decisiones [13].

Uno de los desafíos principales del procesamiento de señales es minimizar las contribuciones de las señales contaminantes de modo de generar estimaciones insesgadas de los productos meteorológicos [14].

En las Figuras 1.1 y 1.2 se muestra, a modo de motivación, dos gráficas de los denominados *indicadores de posición planos* (PPI, acrónimo de *plan position indicator*) correspondientes a los productos denominados *reflectividad* y *velocidad Doppler*, respectivamente. Estos productos se generan a partir de mediciones obtenidas por el radar meteorológico RMA1, situado en la ciudad de Córdoba, el día 13 de Octubre

[2]El sustantivo wifi, castellanizado, proviene de la marca comercial Wi-Fi. Wi-Fi es una familia de protocolos de red inalámbricos basados en el estándar IEEE802.11.

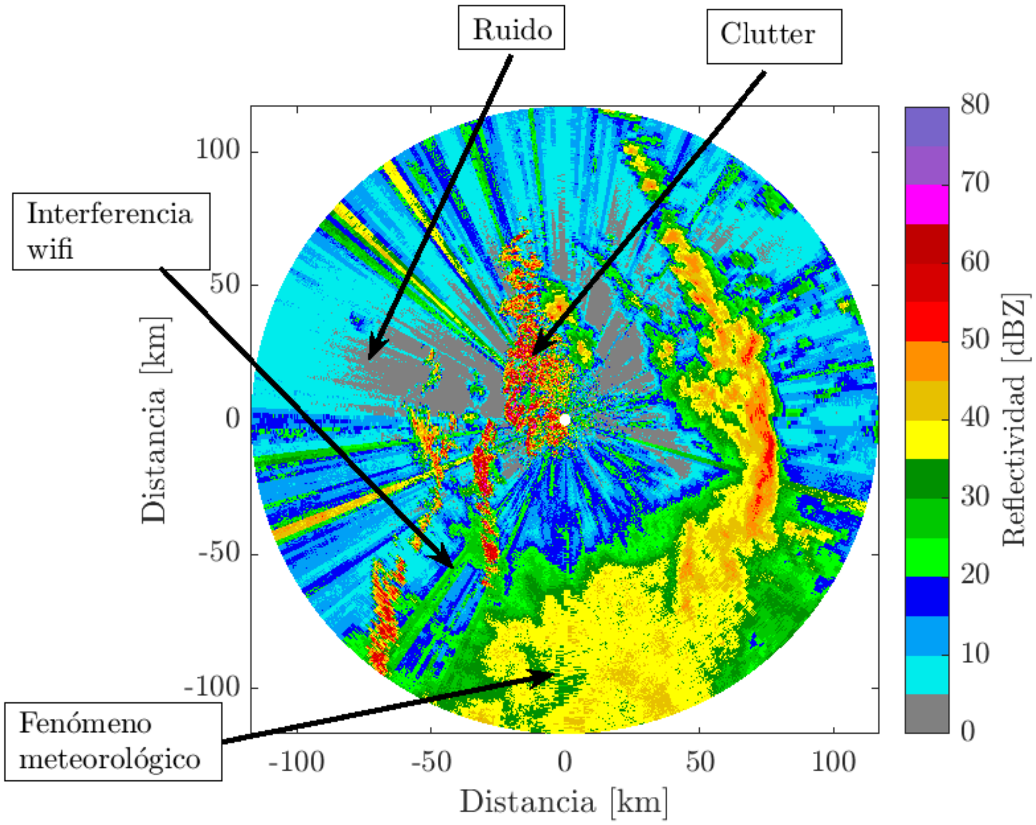


Figura 1.1: Imagen de un PPI de reflectividad en un día de lluvia obtenida con datos del radar meteorológico RMA1 ubicado en Córdoba, Argentina.

2021, a las 10:08 hora local.

En la Figura 1.1 se muestra una situación de medición de lluvia con interferencia wifi. En el segundo cuadrante y parte del tercero se presenta una zona de baja reflectividad asociada a ruido. La región de fenómeno se encuentra en parte del primer, tercer y cuarto cuadrante, mientras que en la cercanía de la transmisión de radar hay una región de clutter terrestre con una marcada intensidad. Además, se puede observar interferencia wifi en radiales con una alta intensidad en contraste con radiales adyacentes.

En la Figura 1.2 se analiza el espectro Doppler de velocidades. Se observa que el fenómeno meteorológico presenta transiciones suaves entre valores consecutivos. Además, ahora en la región de clutter se tiene valor cero, consistente con el valor esperado de un blanco estático. Por otro lado, en la región de ruido se tienen valores aleatorios, coherente con la aleatoriedad de fase que aporta una señal con ruido. Finalmente, se observa que la interferencia, que previamente se manifestaba en la reflectividad a lo largo de la dirección radial y con marcada intensidad, ahora se manifiesta igualmente en la dirección radial pero con valores aleatorios. Este efecto resulta de gran importancia en este trabajo y se abordará en profundidad a lo largo del mismo.

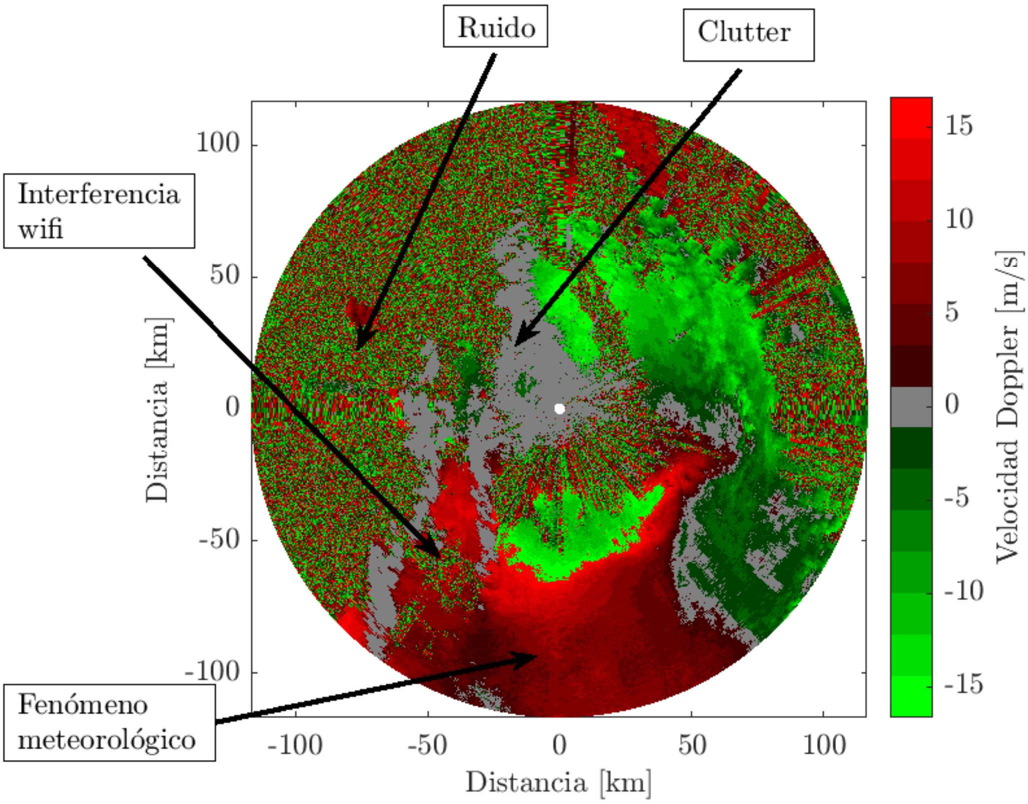


Figura 1.2: Imagen de un PPI de velocidad Doppler en un día de lluvia obtenida con datos del radar meteorológico RMA1 ubicado en Córdoba, Argentina.

1.1.3. Objetivos

El objetivo general del presente trabajo es desarrollar técnicas de detección automática y filtrado de la interferencia wifi en de radar meteorológico a partir de su efecto en la velocidad Doppler.

Como objetivos específicos se plantea:

- Estudiar el efecto de la interferencia en la estimación de la velocidad Doppler.
- Diseñar estrategias de detección de las señales interferentes, a partir de su efecto en la velocidad Doppler.
- Evaluar el desempeño de los algoritmos propuestos utilizando tanto datos sintéticos como mediciones reales de radar meteorológico.

1.2. Antecedentes

Dentro del campo de procesamiento de señales de radar se tienen diferentes tipos de estudios acerca de la interferencia wifi en productos de radar meteorológico. Diversos

estudios se han centrado en estudiar, detectar y corregir los efectos de la interferencia en los productos de radar.

A continuación, se presentan una serie de trabajos que se han realizado a nivel Nacional:

- En el trabajo [15] se estudian las normas WLAN y se diseña un procedimiento de medición que permite registrar las fuentes de interferencia in situ y determinar su origen. Además, se obtiene la geolocalización de las fuentes interferentes y se describen sus características más relevantes.
- En el trabajo [16] se examina el impacto de la interferencia wifi en los productos meteorológicos. El mismo se enfoca en la estimación de los productos de radar polarimétricos y analiza el desempeño de los estimadores en presencia de interferencia, evaluando su sesgo y error cuadrático medio. La investigación se realiza considerando diferentes anchos espectrales del fenómeno meteorológico y utilizando tanto muestras reales como sintéticamente generadas.
- El trabajo [17] describe un algoritmo propuesto para detectar paquetes de dispositivos WLAN basado en la ubicación del preámbulo [18]. El mismo se basa en una prueba de hipótesis sobre el criterio de Neyman-Pearson [19], aprovechando la estructura determinista del preámbulo para generar una señal de referencia y así detectar la interferencia.
- El trabajo [20] describe una técnica de identificación de receptor de radar basada en la generación de una señal de referencia que mejora la detección de señales inalámbricas wifi.
- El trabajo [21] se proponen técnicas de filtrado basadas en la transformada de wavelet y el análisis de multi-resolución. A pesar de que sólo se realiza un análisis cualitativo, se muestra que el filtro tiene un buen desempeño incluso en condiciones de alta interferencia.

Por otro lado, a nivel internacional se destacan los siguientes trabajos:

- El trabajo [7] describe los diferentes métodos que se han utilizado para abordar el problema de la interferencia de las redes inalámbricas en los radares meteorológicos. Algunos de ellos incluyen restricciones legales y sanciones para desalentar el uso de las bandas de radar, soluciones de procesamiento de señales para mitigar los efectos de la interferencia, y la reubicación de los radares a bandas no interferidas. También discuten el enfoque de *ataque de fuente* para reducir la interferencia, que implica la identificación y eliminación de dispositivos inalámbricos que causan interferencia.

- En el trabajo [22] se presentan mediciones del impacto de señales RLAN en los radares meteorológicos mediante experimentos y simulaciones en entornos rural-urbanos. Se descubrió que estas señales pueden ser detectadas como ruido blanco aditivo y afectar la capacidad de detectar objetivos débiles. Se determinó que un umbral de -62 dBm es suficiente para proteger al radar, activando el DFS. Sin embargo, aún no se sabe con certeza si las RLAN pueden detectar el radar a tiempo y evitar interferencias.

- En el trabajo [13] se examina el impacto de la interferencia causada por redes WLAN/RLAN en radares meteorológicos que operan en la banda C, en Italia. Se hace un análisis estadístico de la interferencia, comparando los datos registrados entre 2010 y 2014 para mostrar cómo este problema se ha intensificado con el tiempo. Además, se realiza una evaluación de cómo esta interferencia puede afectar a los algoritmos de estimación basados en productos polarimétricos.

- El trabajo [23] presenta una técnica de mitigación de interferencia de radiofecuencia a partir de la descomposición espectral que incorpora la doble polarización. En este sentido, la técnica se basa en generar espectrogramas rango-velocidad y mediante clasificación de imágenes por lógica difusa discriminar las diferentes lıneas espectrales.

1.3. Contribuciones del trabajo

En el contexto amplio de la mitigación de la interferencia wifi en aplicaciones de radar meteorológico, las principales contribuciones de este trabajo son dos relacionadas con la detección de la interferencia a partir de su efecto sobre la velocidad Doppler.

La primera contribución surge a partir de una deducción analítica que muestra que la interferencia produce saltos en la estimación de la velocidad Doppler, de amplitud en módulo igual al valor de la velocidad ambigua. Este desarrollo fue publicado en [24].

Asimismo, la segunda contribución es la propuesta de un algoritmo de detección de interferencia wifi, que se basa en este efecto del salto en la estimación de la velocidad que produce. A lo largo del trabajo también se analiza su desempeño mediantes simulaciones numéricas y empleando mediciones de radar meteorológico.

1.4. Organización de la tesis

El Capítulo 2 se centra en el impacto de la interferencia wifi en la velocidad Doppler del radar meteorológico. En primer lugar, se formula el problema mediante el modelado de la señal de radar y de la interferencia wifi, y se deriva el estimador de la velocidad

Doppler. A continuación, se estudia el fenómeno de la probabilidad de salto como resultado de la interferencia en la señal de radar. Se llevan a cabo simulaciones numéricas para validar el modelo También se evalúan los errores en la estimación de velocidad. Luego, para estimar la probabilidad de salto experimental, se realiza una prueba de gaussianidad, buscando un umbral óptimo. Se evalúa además el caso de utilizar un umbral fijo arbitrario.

El Capítulo 3 está dedicado a la detección de interferencia wifi en el radar meteorológico a partir de la velocidad Doppler. En primera instancia, se describe el algoritmo de detección empleado. A continuación, se explica con detalle el funcionamiento del detector. Se analiza el rendimiento del detector, evaluándolo mediante diversas métricas y realizando simulaciones numéricas para poner a prueba los algoritmos desarrollados.

El Capítulo 4 tiene como objetivo el procesamiento de mediciones de radar meteorológico con el detector desarrollado en el capitulo 3. Se aborda el procesamiento de las mediciones de RMA, incluyendo la descripción de sus características. Luego se hace un análisis de los anchos espectrales y de la estimación de nivel de ruido. Posteriormente, una vez seleccionados los datos de radar, se analiza el desempeño del detector de forma cuantitativa, desarrollando y analizando pruebas de probabilidad de falsa alarma y detección. Finalmente, se lleva a cabo la mitigación de la interferencia wifi y se hace un análisis de forma cualitativa y, por ultimo, se presentan las conclusiones del capítulo.

Por último, en el Capítulo 5 se presentan las principales conclusiones derivadas de este trabajo. Además, se incluyen, como trabajo a futuro, las posibles mejoras a implementar.

Capítulo 2

Efecto de la interferencia wifi sobre la velocidad Doppler

En este este capítulo se analiza el efecto de la interferencia wifi que contamina la señal recibida por el radar meteorológico sobre la estimación de velocidad Doppler media.

Se parte de la formulación del problema, donde se definen los modelos de señal a utilizar tanto para el fenómeno meteorológico como para la interferencia, y se formula el estimador a utilizar. En primer lugar se considera un modelo simplificado de señal recibida para el objetivo meteorológico, que consiste en considerar que el ancho espectral es igual a cero. Usando este modelo simplificado, se estudia de forma analítica cómo afecta la interferencia a la estimación de la velocidad Doppler media, cuando se emplea el estimador por pares de pulsos.

En base a este estudio analítico se formula el concepto de probabilidad de saltos de velocidad. Se desarrollan simulaciones numéricas que permiten estudiar el efecto de la interferencia utilizando un modelo de señal más realista para el objetivo meteorológico, contemplando anchos espectrales arbitrarios.

2.1. Formulación del problema

Un radar pulsado transmite un pulso de duración τ, típicamente del orden de los μs, espera un tiempo de guarda t_g, seguido del cual inicia el intervalo de tiempo que se conoce como ventana de recepción, t_w. Durante el intervalo t_w el radar muestrea cada T_s la señal recibida producto de ecos correspondientes al pulso transmitido. Una vez transcurrido este proceso el radar transmite un nuevo pulso y se repite el procedimiento. El intervalo de tiempo entre pulsos T, que es del orden de los ms, se conoce como intervalo de repetición de pulso (PRI, por sus siglas en inglés) y su inversa se llama frecuencia de repetición de pulso (PRF, por sus siglas en inglés). Cabe aclarar que este

modo de operación descripto, en el que el intervalo entre pulsos es constante, conocido como *PRI*, es *uno* de los posibles modos de operación del radar. Si bien existen otras alternativas, como la operación en *modo staggered* [2], esta tesis se centrará en el modo de operación PRI uniforme.

Al momento de procesar los datos es de utilidad definir una forma de almacenarlos. Se puede pensar que las muestras adquiridas en la ventana de recepción correspondiente a un pulso se ordenan en un vector columna, donde cada elemento tendrá una correspondencia con la distancia en la se produce la reflexión, y por eso conoce como dimensión en rango. Denotando como R_0 a la distancia correspondiente al primer elemento, la distancia asociada a cada elemento es $R_0 + n\Delta R_s$, donde $n = 0, \cdots, N-1$ y $\Delta R_s = cT_s/2$, siendo c la velocidad de propagación de la luz en el vacío y N el número total de muestras adquiridas. A cada elemento de este vector se lo conoce como celda de rango [19]. La frecuencia de muestreo en esta dimensión, $f_s = 1/T_s$, suele tomar valores del orden de los 100 kHz a los 10 MHz, que como se verá es grande en relación a otras escalas de muestreo que se presentan en radar, motivo por el cual a la dimensión en rango también se la denomina dimensión *tiempo rápido*.

Al transmitir el siguiente pulso de la secuencia, el proceso de adquisición se repite y se cuenta con un nuevo vector, donde cada elemento está asociado a la misma distancia que el elemento correspondiente del primer vector. Con los sucesivos vectores asociados a cada pulso transmitido, es posible construir una matriz como la que se presenta en la Figura 2.1. La dimensión de las filas corresponden a la dimensión en rango, donde cada muestra está separada T_s en tiempo o ΔR_s en distancia. La dimensión de las columnas se corresponde a las muestras tomadas de los distintos pulsos a una misma distancia. Las muestras en esta dimensión se encuentran separadas por el PRI y se conoce como dimensión de pulsos. La PRF=1/PRI, toma valores en el orden de los 100 Hz a los 100 kHz, por lo que a esta dimensión también se la denomina dimensión *tiempo lento* en contraposición con la dimensión tiempo rápido.

Dependiendo de lo que se desee observar se toma una u otra dimensión para llevar a cabo el procesamiento de la señal, incluso existen otras dimensiones que no serán consideradas en este trabajo que surgen de considerar distintas polarizaciones de la señal transmitida y/o recibida y distintas antenas que conforman arreglos de sensores. En radar meteorológico es de interés conocer los momentos espectrales de la señal: a partir del momento de orden cero se obtiene la reflectividad, el momento de orden uno es proporcional a velocidad Doppler media y el momento de segundo orden es proporcional al ancho espectral [2]. Para estimar estos momentos, lo que se conoce como procesamiento Doppler, resulta más conveniente realizar el procesamiento en la dimensión tiempo lento, es decir tomando las muestras por filas, tal como se indica en verde en la Figura 2.1.

El número de muestras en la dimensión tiempo lento que se toman para realizar

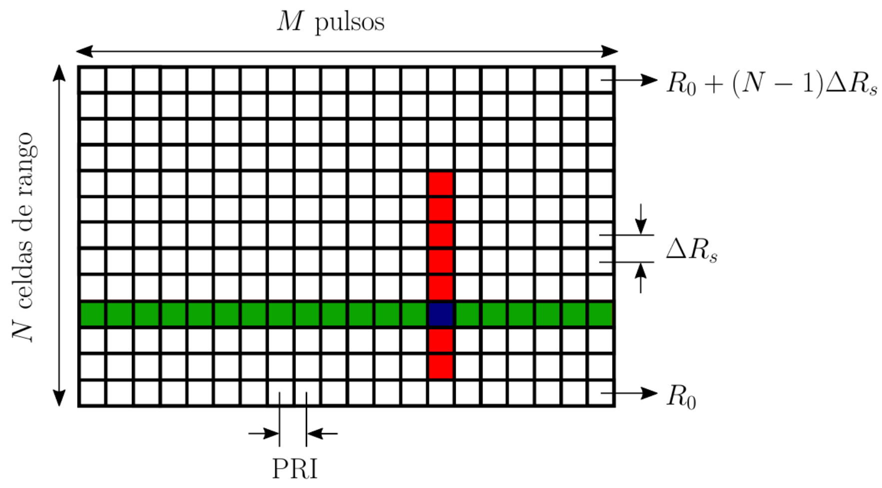


Figura 2.1: Matriz de datos. En verde se resaltan las muestras dentro de un CPI y en rojo la interferencia wifi.

el procesamiento Doppler se conoce como intervalo de procesamiento coherente (CPI, por sus siglas en inglés). Existen diferentes maneras de definir el CPI y dependen de la aplicación [19]. En radar meteorológico es habitual definir el CPI como el número de pulsos que entran en un grado en acimut y por lo general toma valores entre 32 y 64 pulsos en función de la velocidad de giro que imponga la estrategia de operación.

En la situación estándar se espera que la señal en un CPI esté conformada por contribuciones de objetivo meteorológico, ruido propio del sistema y de *clutter terrestre*, es decir reflexiones no deseadas sobre el terreno de la propia señal del radar. Asimismo, un dispositivo WLAN/RLAN que esté ubicado relativamente cerca del radar puede comenzar a transmitir en cualquier instante y mantenerse transmitiendo durante parte o todo el intervalo que dura la ventana de recepción, teniendo en cuenta que los paquetes son de largo variable. Los paquetes inalámbricos transmitidos serán adquiridos por el receptor del radar porque ambos equipos operan en la misma banda de frecuencias. Este tipo de interferencia contamina varias muestras sucesivas en la dimensión tiempo rápido, tal como se esquematiza en rojo en la Figura 2.1. Sin embargo, un paquete solo contaminará una muestra en la dimensión tiempo lento, representada por la muestra en azul en la Figura 2.1.

Sobre esta formulación, a continuación se analiza el efecto que posee la contaminación de la señal dentro de un CPI como consecuencia de la interferencia wifi sobre la velocidad Doppler media.

2.1.1. Modelado de la Señal Radar

Con el fin de comprender el efecto causado por la injerencia de señales interferentes de wifi en la estimación de velocidad Doppler, se formula un modelo de la señal recibida por el radar meteorológico. En su configuración estándar, la señal de radar en la

dimensión tiempo lento, $z[m]$, está conformada por

$$z[m] = p[m] + i[m] + c[m] + n[m], \tag{2.1}$$

donde $p[m]$ representa el fenómeno meteorológico, $i[m]$ denota la existencia de interferencia wifi, $c[m]$ es la contribución de clutter y $n[m]$ es la componente de ruido. La separación temporal entre muestras en esta dimensión la determina el PRI, el que se denota como T.

Con el fin de estudiar la acción de la interferencia, se supone que la celda de rango bajo prueba no posee contribuciones de clutter y tiene una relación de potencia de señal a potencia de ruido (SNR, por su siglas en inglés) lo suficientemente alta como para despreciar la componente de ruido, que es una condición frecuente en la práctica. Por lo tanto, la Ecuación (2.1) se reduce a

$$z[m] = p[m] + i[m]. \tag{2.2}$$

Modelo de fenómeno meteorológico simplificado

Para la deducción analítica del efecto de la interferencia sobre la estimación de velocidad se parte de una simplificación del modelo de la componente del fenómeno $p[m]$, que consiste en suponer que es un tono, es decir

$$p[m] = Ae^{-j2\pi f_D mT - j\phi}, \tag{2.3}$$

donde A es una constante proporcional a la intensidad del fenómeno, $\phi = 4\pi r/\lambda$ es el término de fase asociada con la distancia r que recorrió la onda hasta alcanzar al objetivo, siendo λ la longitud de onda, y $-2\pi f_D mT$ es el término de fase correspondiente al desplazamiento Doppler, f_D, proporcional a la velocidad radial, v, del objetivo.

Posteriormente, se extenderá el análisis considerando que la componente de señal posee un ancho espectral mayor a cero.

Modelo de interferencia wifi

A partir del planteo presentado en la Sección 2.1, se observa que, esencialmente, la interferencia wifi afecta la señal recibida por el radar en la dimensión tiempo rápido para algunos pulsos. Con lo cual, solo algunas muestras se contaminan con interferencia por cada CPI de M pulsos en tiempo lento. Teniendo presente que cada CPI contiene unos pocos pulsos, un modelo simple que representa la interferencia wifi es considerarla de la forma

$$i[m] = Ie^{j\theta}\delta[m - m_\ell], \tag{2.4}$$

donde I es un factor de amplitud, θ es la fase de la señal que se modela como aleatoria con distribución $\mathcal{U}[0, 2\pi]$, $\delta[\cdot]$ es la función delta de Kronecker y m_ℓ es un entero que toma valores entre 0 y $M-1$, que indica qué pulso fue interferido.

2.1.2. Estimación de la Velocidad Doppler

Uno de los métodos más utilizados para estimar la velocidad Doppler es la técnica de procesamiento de pares de pulsos (PPP, por sus siglas en inglés), cuyo estimador posee la expresión [2]

$$\hat{v} = \frac{\lambda}{4\pi T} \arg \hat{R}_z[1], \tag{2.5}$$

donde $\hat{R}_z[1]$ representa el estimado de la autocorrelación de la señal recibida por el radar, $z(t)$, en el instante T. Considerando que la autocorrelación estadística se aproxima por medio de los promedios temporales, la expresión que permite evaluar $\hat{R}_z[1]$ resulta

$$\hat{R}_z[1] = \frac{1}{M-1} \sum_{m=0}^{M-2} z[m+1]z^*[m], \tag{2.6}$$

donde $*$ denota la operación conjugado.

Análisis del estimador de velocidad

Con el objetivo de analizar analíticamente el efecto de la interferencia sobre la estimación de la velocidad, se comienza la derivación reemplazando (2.2) en (2.6), se distribuyen los términos y se reagrupan, resultando

$$\begin{aligned} \hat{R}_z[1] &= \frac{1}{M-1} \sum_{m=0}^{M-2} p[m+1]p^*[m] + p[m+1]i^*[m] + i[m+1]p^*[m] + i[m+1]i^*[m] \\ &= \hat{R}_p[1] + \hat{R}_i[1] + \frac{1}{M-1} \sum_{m=0}^{M-2} p[m+1]i^*[m] + i[m+1]p^*[m], \end{aligned} \tag{2.7}$$

siendo $\hat{R}_p[\cdot]$ y $\hat{R}_i[\cdot]$ estimados de las autocorrelaciones de la componente meteorológica y de la interferencia, respectivamente.

Haciendo uso del modelo de interferencia dado por (2.4), para $m_\ell \neq 0$ y $m_\ell \neq M-1$, se obtiene que

$$\begin{aligned} \hat{R}_i[1] &= \frac{1}{M-1} \sum_{m=0}^{M-2} i[m+1]i^*[m] \\ &= \frac{1}{M-1} \sum_{m=0}^{M-2} Ie^{j\theta}\delta[m+1-m_\ell]Ie^{-j\theta}\delta[m-m_\ell] = 0, \end{aligned} \tag{2.8}$$

y los términos cruzados resultan

$$\frac{1}{M-1}\sum_{m=0}^{M-2} p[m+1]i^*[m] = \frac{Ie^{-j\theta}}{M-1}p[m_\ell+1], \tag{2.9}$$

$$\frac{1}{M-1}\sum_{m=0}^{M-2} i[m+1]p^*[m] = \frac{Ie^{j\theta}}{M-1}p^*[m_\ell-1]. \tag{2.10}$$

A partir de (2.8), (2.9) y (2.10), es posible escribir (2.7) como

$$\hat{R}_z[1] = \hat{R}_p[1] + \frac{Ie^{-j\theta}}{M-1}p[m_\ell+1] + \frac{Ie^{j\theta}}{M-1}p^*[m_\ell-1]. \tag{2.11}$$

Reemplazando la expresión (2.3), correspondiente al modelo de la componente meteorológica, en (2.11) se obtiene

$$\begin{aligned}\hat{R}_z[1] &= A^2e^{-j2\pi f_D T} + \frac{IA}{M-1}\left[e^{-j\theta}e^{-j2\pi f_D(m_\ell+1)T-j\phi} + e^{j\theta}e^{j2\pi f_D(m_\ell-1)T+j\phi}\right] \\ &= A^2e^{-j2\pi f_D T}\left[1 + \frac{\sqrt{ISR}}{M-1}\left(e^{-j(2\pi f_D m_\ell T+\phi+\theta)} + e^{j(2\pi f_D m_\ell T+\phi+\theta)}\right)\right],\end{aligned} \tag{2.12}$$

donde $ISR = I^2/A^2$.

Finalmente, haciendo uso de la relación entre la función coseno y la exponencial compleja, $\hat{R}_z[1]$ se reduce a

$$\hat{R}_z[1] = \gamma A^2 e^{-j2\pi f_D T}, \tag{2.13}$$

donde se definió

$$\gamma = 1 + \frac{2\sqrt{ISR}}{M-1}\cos(\alpha), \tag{2.14}$$

con $\alpha = 2\pi f_D m_\ell T + \phi + \theta$.

La Ecuación (2.13) es la expresión final del estimador de la correlación evaluada en el instante T cuando existe interferencia presente. En el caso ideal, resulta $\hat{R}_z[1] = A^2e^{-j2\pi f_D T}$. Es decir, que γ es un factor adicional que aparece por efecto de la interferencia.

Para completar la estimación de la velocidad a través de (2.5) resta tomar la fase de $\hat{R}_z[1]$. Al hacer esto, al término de fase deseado de la exponencial $A^2e^{-j2\pi f_D T}$, se le sumará la fase del factor γ. Como se puede analizar de la ecuación 2.14 γ es real, lo que implica que sólo su signo tendrá impacto sobre la fase de $\hat{R}_z[1]$ y por ende en la estimación de la velocidad. Por lo cual, al evaluar el estimador de la velocidad se tienen dos resultados posibles. Cuando $\gamma > 0$ resulta

$$\arg \hat{R}_z[1] = -2\pi f_D T \;\Rightarrow\; \hat{v} = v, \tag{2.15}$$

y, para el caso en que $\gamma < 0$ se obtiene

$$\arg \hat{R}_z[1] = -2\pi f_D T \pm \pi \;\Rightarrow\; \hat{v} = v \pm v_a. \tag{2.16}$$

donde $v_a = \lambda/(4T)$, es la velocidad máxima no ambigua y v denota el valor verdadero de la velocidad.

La conclusión de las expresiones (2.15) y (2.16) es que en las condiciones planteadas la estimación de la velocidad puede resultar sin errores o bien poseer un error igual a $\pm v_a$, lo que se denominará efecto *salto de velocidad*[1]. A modo de ejemplo ilustrativo en la Figura 2.2 se presenta un diagrama fasorial, en que la fase determina la velocidad. En color azul, se representa un fasor con una dada magnitud cuya fase corresponde a la velocidad verdadera. Además, se incluye en color rojo un segundo fasor de igual magnitud, con la misma dirección y sentido opuesto, que representa el fasor cuya estimación resultó afectado por la interferencia, y presenta el efecto de salto de velocidad, derivado del aporte del signo negativo de γ. Es importante aclarar que este análisis es estrictamente válido para el modelo de señal propuesto en la Sección 2.1.

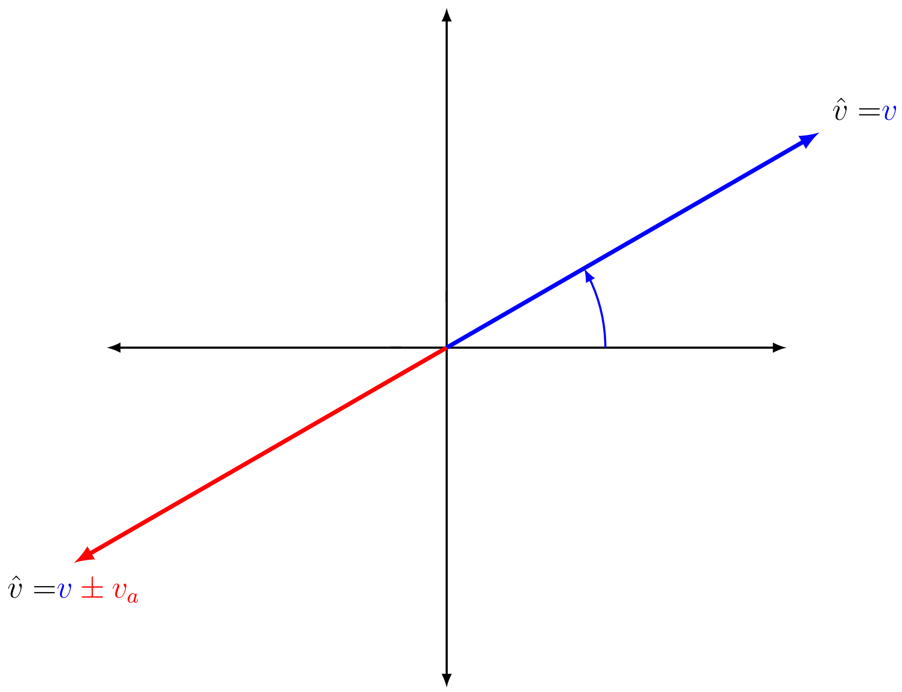


Figura 2.2: Diagrama fasorial de un ejemplo de estimación de la velocidad con y sin interferencia usando el modelo de señal fenómeno simplificado.

Teniendo en cuenta que el efecto salto de velocidad que produce la interferencia depende del signo de γ cabe preguntarse de qué depende que sea negativo. Observando la expresión (2.14) se desprende que el signo de γ es función de tres factores: la relación entre la intensidad de la interferencia y la de la señal, ISR; el número de pulsos M

[1] Cabe aclarar que la indicación de los signos + y - en $\pm v_a$ simplemente se deben al hecho de que el resultado pertenezca al intervalo $(-v_a, +v_a]$.

que conforman el CPI; y el término de fase $\alpha = 2\pi f_D m_\ell T - \phi + \theta$. En principio se puede asumir que α está distribuido uniformemente entre 0 y 2π, con lo cual el coseno tomará valores positivos o negativos cuya magnitud dependerá del valor particular de α. Cuanto menor sea la ISR y/o cuanto mayor sea el número de pulsos M en el CPI, menor será la probabilidad de que exista un cambio de signo, al punto tal que no se producirán saltos de velocidad cuando el factor que multiplica al coseno sea menor a 1.

2.2. Descripción estadística del estimador

Las expresiones (2.15) y (2.16) indican que $\hat{v}$ posee tres valores posibles v, $v + v_a$ y $v - v_a$. Por otro lado, es importante notar que los eventos $\hat{v} = v + v_a$ y $\hat{v} = v - v_a$ son equiprobables[2]. Definiendo como p_v a la probabilidad de que $\hat{v} = v$ y p_a como la probabilidad de que $\hat{v} = v + v_a$ y de que $\hat{v} = v - v_a$, entonces queda definida la función de probabilidad del estimador de velocidad cuando la señal está afectada por la interferencia

$$\begin{aligned} P\{\hat{v} = v\} &= p_v \\ P\{\hat{v} = v + v_a\} &= p_a \\ P\{\hat{v} = v - v_a\} &= p_a. \end{aligned} \tag{2.17}$$

Luego, la esperanza del estimador resulta

$$\mathbf{E}\{\hat{v}\} = vp_v + (v + v_a)p_a + (v - v_a)p_a = v, \tag{2.18}$$

donde se utilizó el hecho de que $p_v + 2p_a = 1$, y su valor cuadrático medio es

$$\begin{aligned} \mathbf{E}\{(\hat{v} - v)^2\} &= \mathbf{E}\{\hat{v}^2\} - v^2 \\ &= v^2 p_v + (v + v_a)^2 p_a + (v - v_a)^2 p_a - v^2 \\ &= v_a^2 p_s, \end{aligned} \tag{2.19}$$

siendo $p_s = 2p_a$ la probabilidad de que se produzca el efecto salto de velocidad.

La Ecuación (2.18) muestra que, en las condiciones planteadas, el estimador resulta insesgado y la raíz de la expresión (2.19) establece cómo se incrementa la dispersión del estimador a partir del efecto de la interferencia [25].

[2]Por lo indicado previamente, sólo uno de los valores $v + v_a$ y $v - v_a$ tendrá sentido (caerá en el intervalo $(-v_a, +v_a])$, y cuál de ellos dependerá de si $v > 0$ o si $v < 0$, eventos que se pueden considerar equiprobables.

2.2.1. Probabilidad de salto

Con la formulación desarrollada el efecto sobre la estimación de velocidad se manifiesta como un salto en v_a respecto de su valor verdadero. Sin embargo, este salto de velocidad no ocurre siempre. Por este motivo, resulta de interés evaluar la probabilidad de salto, p_s, que es el parámetro que indica con qué frecuencia se producirán dichos saltos.

Los saltos ocurren cuando $\gamma < 0$, siendo γ una variable aleatoria (VA) que es función de α, la cual es una VA con distribución $\mathcal{U}(0, 2\pi)$. Luego, la probabilidad de salto se obtiene de evaluar

$$p_s = P\{\gamma < 0\} = P\left\{\cos(\alpha) < -\frac{M-1}{2\sqrt{ISR}}\right\}. \tag{2.20}$$

En primer lugar, se debe tener presente que si

$$-\frac{M-1}{2\sqrt{ISR}} < -1 \;\Leftrightarrow\; ISR < \left(\frac{M-1}{2}\right)^2, \tag{2.21}$$

entonces $P\{\gamma < 0\} = P\{\cos(\alpha) < -1\} = 0$. Por otro lado, cuando

$$-1 \leqslant -\frac{M-1}{2\sqrt{ISR}} < 0 \;\Leftrightarrow\; \left(\frac{M-1}{2}\right)^2 \leqslant ISR < \infty, \tag{2.22}$$

resulta

$$P\{\gamma < 0\} = P\{\alpha_1 < \alpha < 2\pi - \alpha_1\} = 1 - \frac{\alpha_1}{\pi}, \tag{2.23}$$

donde

$$\alpha_1 = \arccos\left(\frac{M-1}{2\sqrt{ISR}}\right). \tag{2.24}$$

En resumen

$$p_s = \begin{cases} 0 & 0 \leqslant ISR < \left(\frac{M-1}{2}\right)^2 \\ 1 - \frac{\alpha_1}{\pi} & \left(\frac{M-1}{2}\right)^2 \leqslant ISR < \infty. \end{cases} \tag{2.25}$$

En la Figura 2.3 se presentan curvas de p_s descriptas por (2.25) en función de ISR, para tres valores de M que habitualmente se emplean en radar meteorológico. Se observa que a medida que incrementa la ISR la probabilidad p_s crece, tendiendo al valor de 0,5. Asimismo, cuanto mayor es el número de pulsos M, mayor es el valor de ISR requerido para que existan saltos. Analizando el término γ, en (2.14), que determina el signo que tendrá la estimación de la autocorrelación $\hat{R}_z[1]$, el valor máximo de p_s tiene sentido, debido a que cuando $\frac{2\sqrt{ISR}}{M-1} > 1$ el $\cos(\alpha)$ determina el signo de la suma, y tiene

un 50 % de probabilidad de tomar un valor mayor a cero y un 50 % de probabilidad de tomar un valor menor a cero debido a que $\alpha \sim \mathcal{U}(0, 2\pi)$.

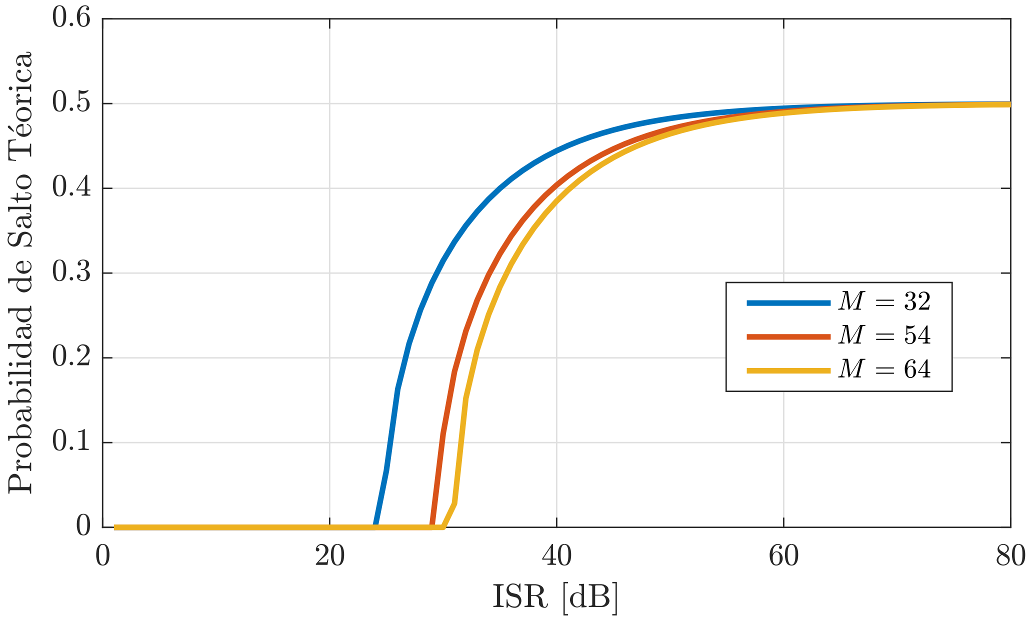


Figura 2.3: Probabilidad de salto en función de ISR para diferentes valores de M.

2.3. Simulaciones Numéricas

2.3.1. Modelo de señal con ancho espectral distinto de cero

El análisis realizado en las secciones anteriores permite comprender como afecta la presencia de interferencia a la estimación de la velocidad. Sin embargo, es necesario refinar el modelo, debido a que (2.3) es una versión muy idealizada de las contribuciones del fenómeno meteorológico en la señal recibida por el radar. Un modelo más representativo de la realidad se basa en contemplar que el objetivo meteorológico no está conformado por un único reflector, sino que compone de contribuciones de múltiples reflectores. La expresión matemática que lo describe es de la forma

$$p[m] = \sum_{n} A_n e^{-j2\pi f_n mT - j\phi_n}. \tag{2.26}$$

donde f_n y ϕ_n son el desplazamiento Doppler y la fase del n-ésimo reflector, siendo $\phi_n = 4\pi r/\lambda$. Tanto f_n como r_n toman valores cercanos entre sí para cada reflector, pero no necesariamente son iguales. Con este modelo se espera que el valor de la velocidad estimada $v = -\lambda f_D/2$ sea el promedio de las distintas velocidades $v_n = -\lambda f_n/2$. A su vez, se destaca que la principal diferencia respecto al modelo de un único reflector es la distribución de valores de velocidad alrededor de v, que son producto de la suma

de las contribuciones de los múltiples reflectores meteorológicos. En consecuencia, se tiene que el modelo de señal mas refinado admite que el ancho espectral de la señal, σ, resulte mayor a cero. A modo ilustrativo en la Figura 2.4 se presenta el segundo modelo de señal.

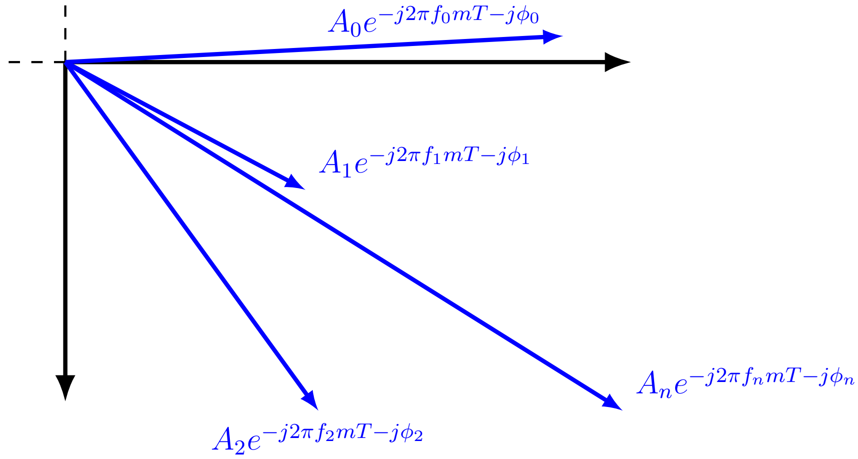


Figura 2.4: Representación fasorial de un objetivo meteorológico compuesto de múltiples reflectores.

El análisis de la estimación de la autocorrelación $\hat{R}_z[1]$ a partir de la estructura del modelo dado por (2.26) permite inferir que se producirá un efecto similar al descripto por (2.13) para cada uno de los fasores que contribuyen al modelo de señal. Es decir que $\hat{R}_z[1]$ será la suma ponderada de fasores que tendrán la fase esperada o la fase esperada más un salto de fase de $\pm\pi$ y la fase resultante será la fase de esa suma. Cada fasor que compone la señal puede manifestar un salto de fase, lo cual dependerá de la relación interferencia a señal individual, ISR_n, y de su fase individual, α_n. Por lo tanto, el efecto de la interferencia sobre la estimación de la velocidad ya no será necesariamente un salto en v_a. Sin embargo, posiblemente se manifieste como un salto de velocidad con un valor menor a v_a, en especial cuando la ISR sea significativa y cuando el ancho espectral sea pequeño.

No se ahonda en la deducción del efecto de la interferencia sobre la estimación de la velocidad cuando $\sigma > 0$ y se limita al análisis cualitativo, debido a que si bien es útil para interpretar lo que sucede, no permite realizar un estudio cuantitativo como ocurrió con el modelo simplificado. En su lugar, se recurrió a implementar una serie de simulaciones numéricas en las que se considera que la componente meteorológica de las mediciones son realizaciones de un Proceso Aleatorio (PA) gaussiano, cuya Densidad Espectral de Potencia (DEP), $S_{pp}(f)$, también es gaussiana [26]

$$S_{pp}(f) = \frac{S_p}{\sqrt{2\pi}\sigma_f} e^{-\frac{(f-f_D)^2}{2\sigma_f^2}}, \tag{2.27}$$

donde S_p es la potencia del fenómeno. Las realizaciones de este PA se generan siguiendo

las ideas propuestas en [27], a las que se le suma interferencia siguiendo el modelo dado por (2.4). Sin pérdida de generalidad en todas las simulaciones que se presentan se utiliza $f_D = 0$, los valores de I y S_p se fijan a partir de la relación que poseen, es decir $ISR = I^2/S_p$ y σ_f se especifica en cada caso (en unidades de velocidad, es decir $\sigma = \sigma_f \lambda/2$). Asimismo, en todas las simulaciones se emplea el método PPP, cuyo estimador de velocidad está dado por (2.5) y se considera $M = 64$ pulsos, $\lambda = 5,36$ cm y $T = 1$ ms, lo que determina una velocidad máxima no ambigua $v_a = 13,33$ m/s.

2.3.2. Estudio de los errores en la estimación de velocidad

La primera simulación consiste en generar realizaciones del PA que representa la señal recibida por el radar, estimar la velocidad Doppler media y medir su sesgo y la raíz del error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés). Para la señal se supone la presencia de un objetivo meteorológico, considerando diferentes anchos espectrales, con ruido aditivo blanco y gaussiano tal que la SNR sea 25 dB. Se abordan en simultáneo los casos con y sin interferencia presente.

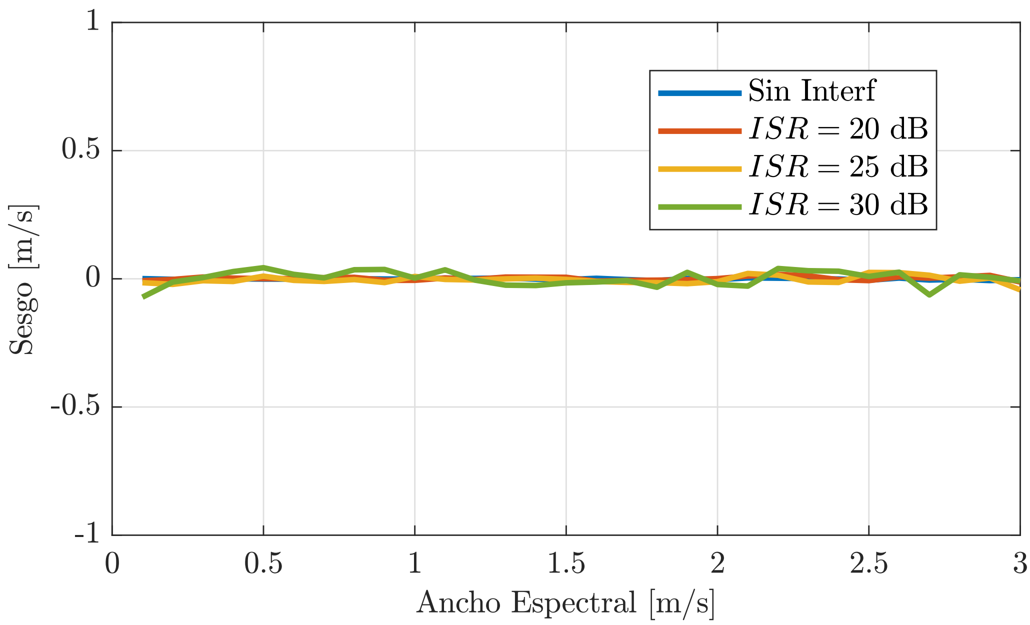


Figura 2.5: Sesgo en función del ancho espectral.

Para cada ancho espectral se utilizan 5000 realizaciones de señal, sobre las que se estiman las velocidades y se aproximan sesgo y RMSE a partir de los promedios muestrales. En las Figs. 2.5 y 2.6 se presentan respectivamente el sesgo y el RMSE en función del ancho espectral, obtenidos para el caso en que no existe interferencia y para tres valores de ISR: 20, 25 y 30 dB. Se observa que el sesgo de la estimación de la velocidad no presenta diferencias significativas para los casos considerados y que es aproximadamente cero, lo que denota un comportamiento insesgado para este

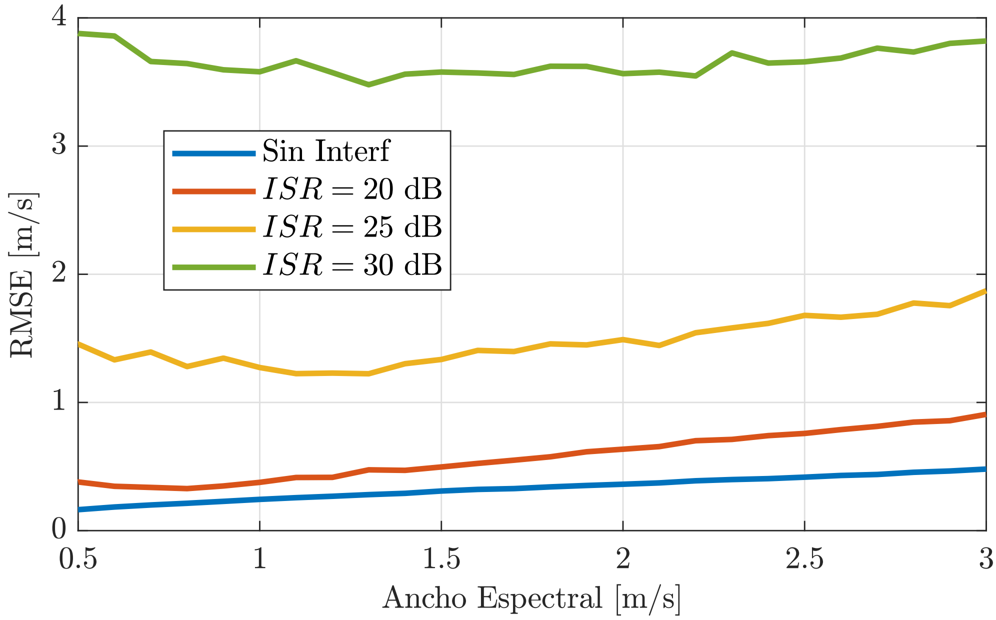


Figura 2.6: RMSE en función del ancho espectral.

estimador aún en presencia de interferencia. Por su parte, para cada ancho espectral el RMSE de la estimación es mayor en los casos que existe interferencia con respecto al caso en que ésta no se encuentra presente, incrementándose significativamente con el valor de ISR, llegando a ser un orden de magnitud mayor con respecto al caso en que no existe interferencia wifi cuando ISR es 30 dB.

El RMSE da una idea promedio del efecto de la interferencia, pero no permite determinar si el incremento del error se debe a un aumento uniforme de la dispersión o bien si se debe a que existen saltos de velocidad en algunos de los estimados mientras los demás poseen un valor en torno a la velocidad verdadera. Por este motivo, en las Figuras 2.7, 2.8 y 2.9 se presentan los valores de los estimados de velocidad de cada realización, con y sin interferencia, para tres valores típicos de ancho espectral: 0,5, 1 y 2 m/s. Para el caso con interferencia se toma $ISR = 30$ dB. En todos los casos, se observa que los estimados presentan saltos de velocidad, y que los mismos no siempre son saltos de v_a en magnitud. Para el ancho espectral de 0,5 m/s dichos saltos se encuentran bien definidos y se aproximan a v_a, lo cual es de esperar debido a que este modelo es el que más cerca se encuentra del modelo de señal idealizado a través de un único fasor. A medida que el ancho espectral se incrementa los saltos en velocidad se reducen respecto de v_a, lo que se condice con la descripción realizada en función del modelo refinado presentado en la Sección 2.3.1. Por este motivo, es de interés medir la probabilidad de salto en esta situación y compararla con la del modelo analítico presentado en la Sección 2.1.

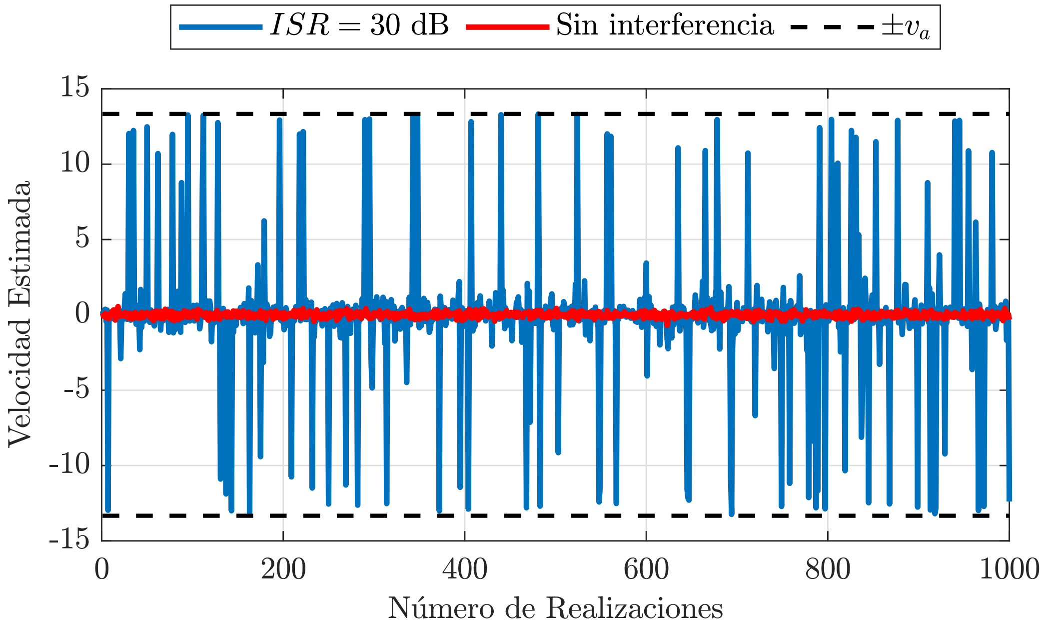


Figura 2.7: Estimados de velocidad por realización, con y sin interferencia para ancho espectral de 0.5 m/s.

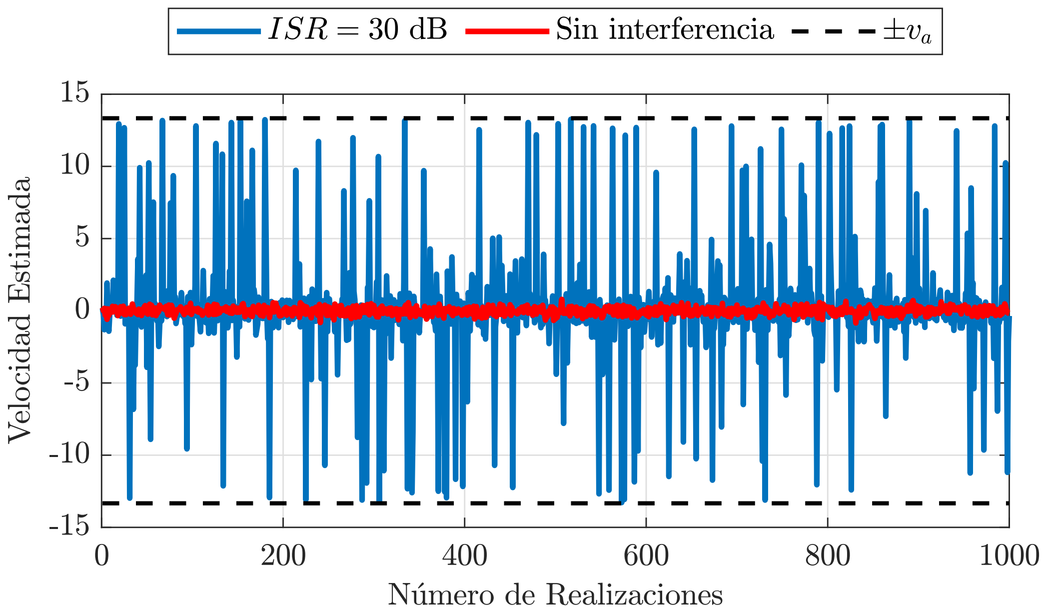


Figura 2.8: Estimados de velocidad por realización, con y sin interferencia para ancho espectral de 1 m/s.

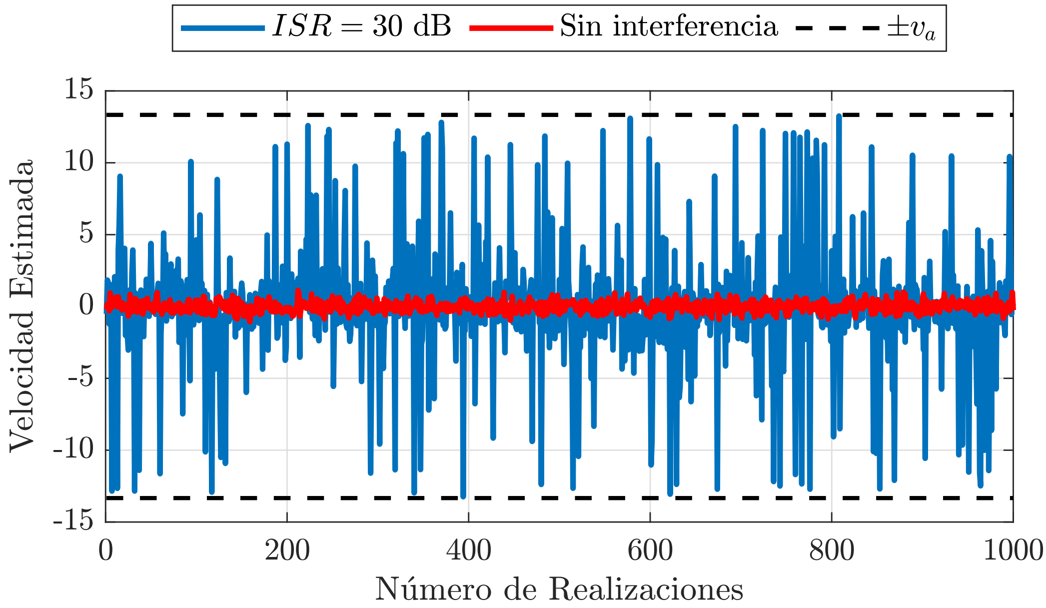


Figura 2.9: Estimados de velocidad por realización, con y sin interferencia para ancho espectral de 2 m/s.

2.3.3. Prueba de gaussianidad

El problema que se presenta al momento de evaluar la probabilidad de salto para las señales que poseen ancho espectral distinto de cero es que es necesario definir qué es un salto de velocidad en el estimado, debido a que, como se observó, estos saltos no se producen necesariamente con un valor igual a $\pm v_a$ y además la amplitud y frecuencia de los saltos cambia con el ancho del espectro considerado.

Por ello, se propone realizar una prueba sobre los estimados que permita establecer un umbral a partir del cual determinar si un estimado está afectado por un salto de velocidad producto de la presencia de interferencia. El análisis de los estimados de velocidad para cualquier ancho espectral cuando no existe interferencia muestra que los mismos presentan una distribución aproximadamente gaussiana. En cambio, la FDP de los estimados de velocidad se aparta de una gaussiana cuando existe interferencia presente en la señal, y presenta colas pesadas, como consecuencia de los saltos de velocidad que no pueden ser ajustados correctamente con una FDP gaussiana. A partir de este comportamiento se indagará en el uso de una prueba de gaussianidad.

El proceso para determinar un umbral óptimo de velocidad utilizando la prueba de gaussianidad consiste en utilizar umbrales simétricos sobre los estimados, con signo positivo y negativo, $\pm v_u$, que se irán desplazando. Se inicia con el valor de umbral $v_u = v_a$ y se lo reduce gradualmente. En cada paso del umbral se aplica una prueba de gaussianidad sobre los estimados que quedan contenidos entre los umbrales establecidos. Se espera que al comienzo del proceso la prueba de gaussianidad de un resultado falso

y a medida que se reduzca el valor de v_u se llegue a un valor tal que la estadística de los estimados quede representada por una distribución gaussiana. El primer valor de v_u que indique que la prueba es verdadera se toma como umbral óptimo para establecer la existencia de un salto de velocidad. Cabe remarcar que el umbral será función tanto del ancho espectral como del valor de ISR.

Existen diferentes pruebas de gaussianidad, en este trabajo se utiliza una muy simple que se basa en la curtosis, k, la que se define a partir del momento de cuarto orden de la VA considerada [28]

$$k = \frac{\mathbb{E}\{(\hat{v} - \mathbb{E}\{\hat{v}\})^4\}}{\mathbb{E}\{(\hat{v} - \mathbb{E}\{\hat{v}\})^2\}^2}. \tag{2.28}$$

La curtosis es un indicador de cómo se concentran los valores de la VA en la zona central de la FDP con respecto a sus colas. En la prueba de gaussianidad que emplea este indicador se evalúa el exceso de curtosis con respecto a 3, que es el valor de curtosis de una VA con FDP gaussiana. Cabe remarcar que además de la curtosis en este tipo de pruebas se suele incluir la medición de la asimetría de la densidad, evaluada a través del momento de orden tres. Sin embargo, en este caso la asimetría no se tuvo en cuenta porque todas las densidad consideradas son simétricas respecto de sus medias por las características del problema. Los pasos de la prueba de gaussianidad se enumeran a continuación [28]:

1. estimar la media, $\bar{v}$, y la desviación estándar, s_v, de los estimados de velocidad

$$\bar{v} = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} \hat{v}_n \tag{2.29}$$

$$s_v = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{n=1}^{N}(\hat{v}_n - \bar{v})^2}, \tag{2.30}$$

2. estimar el exceso de curtosis empleando el estimador insesgado dado por

$$\Delta\hat{k} = \frac{N(N+1)}{(N-1)(N-2)(N-3)}\sum_{n=1}^{N}\left(\frac{\hat{v}_n - \bar{v}}{s_v}\right)^4 - \frac{3(N-1)^2}{(N-2)(N-3)}, \tag{2.31}$$

3. evaluar la desviación estándar del exceso de curtosis

$$s_k = \sqrt{\frac{24N(N-1)^2}{(N-2)(N-3)(N+5)(N+3)}}, \tag{2.32}$$

4. calcular el estadístico, z_k, para la curtosis como

$$z_k = \Delta\hat{k}/s_k, \tag{2.33}$$

5. comparar z_k para la región crítica obtenida a partir de una distribución gaussiana. Se tomará un intervalo de confianza del 95 %, lo que implica que la región de aceptación es $-1,96 \leqslant z_k \leqslant 1,96$.

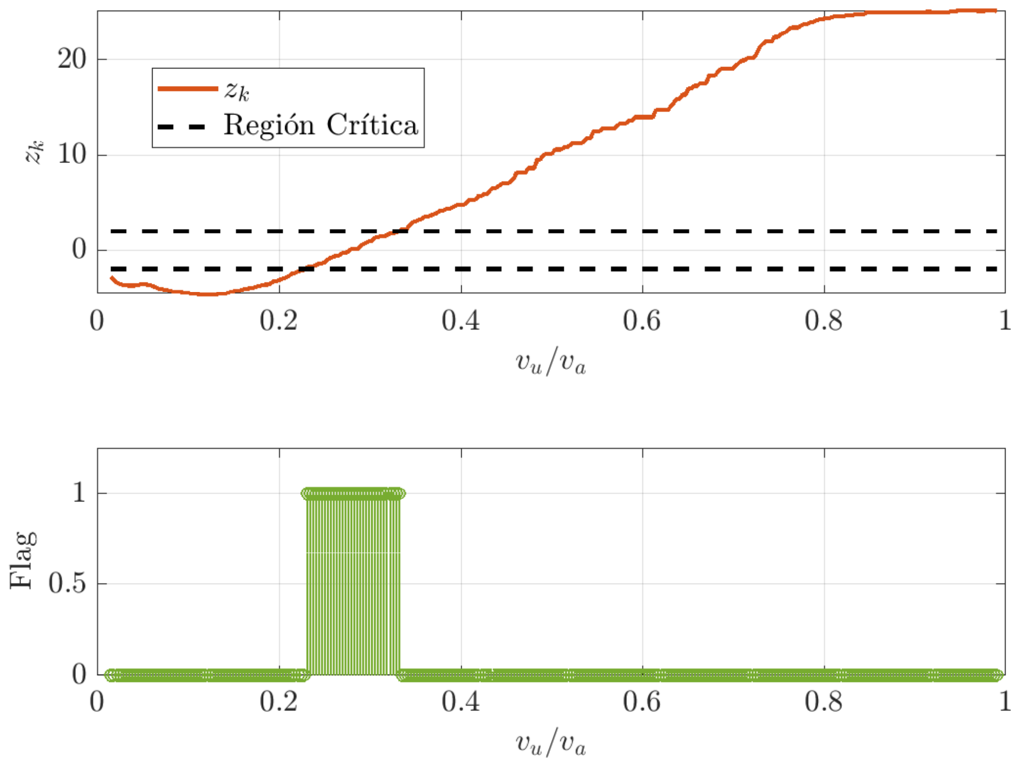


Figura 2.10: Prueba de gaussianidad para estimados de velocidad obtenidos con $ISR = 30$ dB y $\sigma = 2$ m/s.

2.3.4. Umbral óptimo

Siguiendo el procedimiento descripto en la sección previa, se calcula el umbral óptimo para estimados de velocidad obtenidos de realizaciones de la señal de radar generadas como un PA con valores de ISR en el rango de 0 a 60 dB, SNR de 25dB y cuatro valores de anchos espectrales 0,5, 1, 1.5 y 2 m/s. Los umbrales obtenidos permitirán evaluar la probabilidad de salto en una etapa posterior.

En la parte parte superior de la Figura 2.10 se muestran los valores del estadístico z_k de la prueba de gaussianidad en función de los valores del umbral normalizados

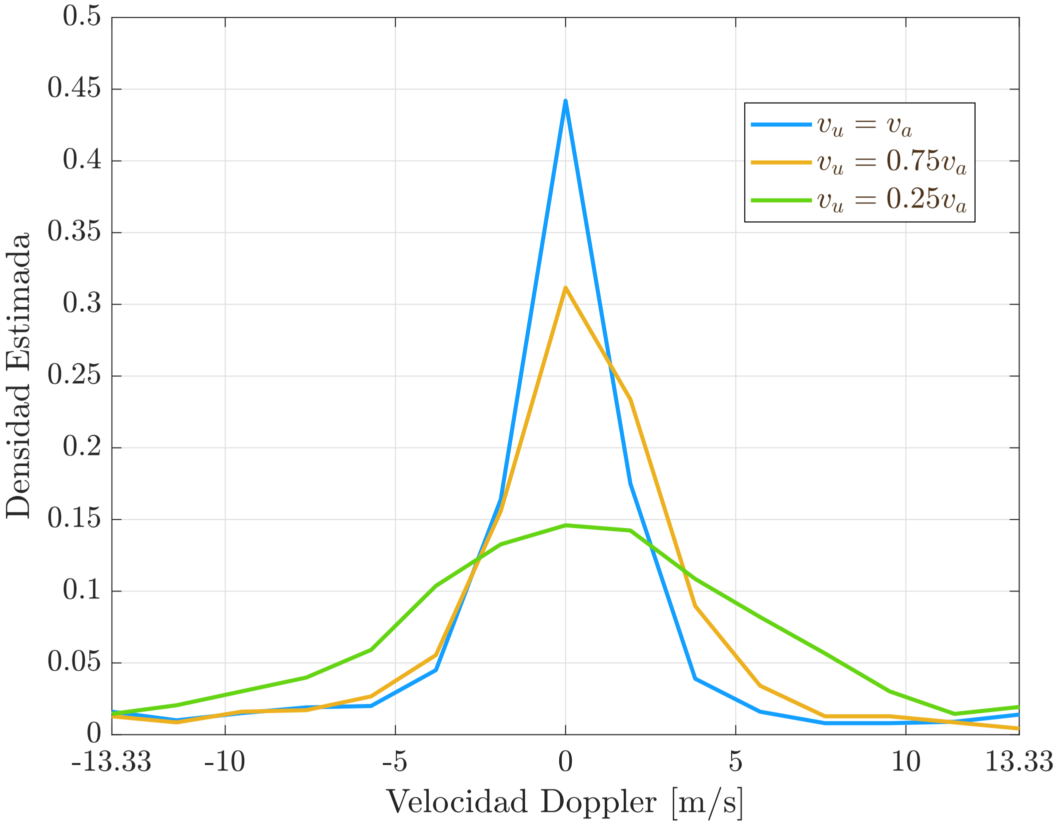


Figura 2.11: Histogramas de los estimados de velocidad para tres umbrales diferentes, obtenidos con $ISR = 30$ dB y $\sigma = 2$ m/s.

respecto de v_a, donde $ISR = 30$ dB y $\sigma = 2$ m/s. En el gráfico se delimita la región crítica, en cuyo interior la prueba de gaussianidad es verdadera. Además, en la parte inferior se incluye un gráfico en el que se presenta un flag (bandera), que toma el valor 0 cuando la prueba resulta falsa y toma el valor 1 cuando el resultado de la prueba es verdadero. De acuerdo con la prueba formulada, se observa que inicialmente, cuando el umbral es grande, la FDP de los estimados no se ajusta correctamente a una distribución gaussiana, y z_k toma un valor elevado muy por encima de 1,96. Sin embargo, cuando el umbral se reduce lo suficiente, z_k decrece. Con este proceso, se llega a un rango de umbrales para los que la prueba de gaussiana arroja el valor verdadero, $-1,96 \leqslant z_k \leqslant 1,96$. Si se continúa con la reducción del umbral z_k toma valores $z_k < -1,96$ y la prueba resulta nuevamente falsa. El comportamiento de este caso particular describe la situación general para cualquier valor de ISR y σ considerados en este trabajo, cambiando únicamente el rango de valores del umbral donde la prueba de gaussianidad es verdadera. En todos los casos se toma como umbral óptimo el valor del umbral que se obtiene cuando $z_k \approx 0$.

Por otro lado, en la Figura 2.11 se presentan histogramas que aproximan a la FDP de los estimados para tres valores de los umbrales: el máximo valor de umbral

considerado, v_a; el umbral óptimo determinado a través de la prueba, 0,25v_a; y un valor intermedio de umbral, 0,75v_a. En estos histogramas se aprecia el efecto del cambio de la concentración de los valores de la densidad en la zona central de la FDP.

2.3.5. Estimación de la probabilidad de salto

Se busca estimar de manera experimental la probabilidad de salto p_s en función de la ISR. Para el modelo de fenómeno meteorológico se utiliza el modelo de señal más refinado y se los resultados obtenidos se comparan con la probabilidad de salto analítica dada por (2.25), obtenida utilizando el modelo de señal idealizado. El procedimiento para llevar a cabo este cálculo consiste en contar el número de estimados que se encuentran fuera del intervalo $-v_u$ a v_u, para cada umbral v_u correspondiente, y dividirlo por el número total de estimados de velocidad. Este proceso se repitió para cada valor de ISR y para los valores de ancho espectral de 0,5, 1, 1,5 y 2 m/s.

En la Figura 2.12 se presentan las probabilidades de salto experimentales obtenidas utilizando los umbrales óptimos seleccionados mediante la prueba de gaussianidad para cada ancho espectral e ISR. Además, se incluye la probabilidad de salto analítica dada por (2.25). Se observa que las curvas experimentales tienen un comportamiento similar a la probabilidad analítica, es decir deja de ser cero para un dado valor de ISR a partir del cual comienza a crecer con un comportamiento semejante. Sin embargo, existen algunas diferencias. En primer lugar, el valor de ISR a partir del cual p_s deja de ser cero es menor cuando el ancho espectral de la señal es distinto de cero. Una explicación de este comportamiento, se basa en la variación del umbral óptimo elegido por la prueba de gaussianidad, naturalmente si se eleva el umbral, la probabilidad de detección de salto se reduce. Por otro lado, las curvas de p_s experimental poseen cierta dispersión en torno a la analítica, siendo las de menor σ las que más se apartan. A pesar de las diferencias, estos resultados permiten validar que el modelo simplificado y afirmar que la probabilidad de salto analítica brinda una noción fehaciente del efecto de la interferencia sobre la estimación de la velocidad.

Si bien la prueba de gaussianidad arrojó los resultados presentados, durante los ensayos realizados se observó que para algunas realizaciones no se obtiene una región crítica que permita elegir un umbral. En particular mostró cierta inestabilidad para anchos espectrales grandes, siendo difícil establecer un umbral cuando $\sigma > 2$ m/s. Teniendo en cuenta que en el próximo capitulo se emplearán estos resultados para deducir un detector que permita determinar la existencia de interferencia en un registro de datos y que dicho detector será puesto a prueba con mediciones reales, en la Figura 2.13 se presenta el calculo experimental de p_s tomando arbitrariamente como umbral $v_u = 0{,}5v_a$, para el mismo rango de ISR y los mismos anchos espectrales de la situación previa. Cabe destacar que cuando el umbral está fijo en 0,5v_a las curvas experimentales

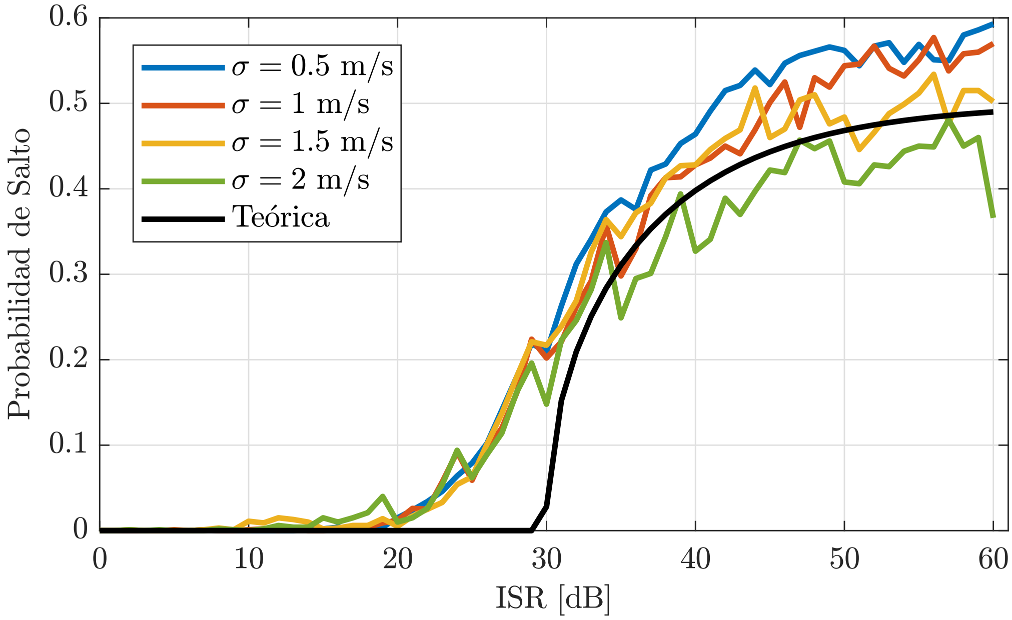


Figura 2.12: Probabilidad de salto en función de ISR calculada con umbrales de saltos de velocidad a partir de una prueba de gaussianidad.

presentan una tendencia similar entre sí, donde la probabilidad de salto de velocidad tiene una menor dependencia con el ancho espectral, y en particular, el comportamiento de la p_s se ve más estable al aumentar la ISR. Sin embargo, si bien se aproxima bastante al caso con ancho espectral distinto de cero, presenta un sesgo. Este se debe a la dispersión que poseen las probabilidades obtenidas en las simulaciones y en parte a la dependencia del umbral elegido.

2.4. Conclusiones

En este capítulo se presentó un análisis del efecto que posee la interferencia wifi sobre la estimación de la velocidad Doppler media en aplicaciones de radar meteorológico, cuando este opera con intervalo de repetición de pulso constante.

En primer lugar, se realizó un estudio analítico basado en un modelo simplificado de la señal que supone que el ancho espectral es cero. Sobre este modelo se verificó que el error que produce la interferencia sobre la velocidad estimada se presenta como un salto de velocidad igual en módulo al valor de la velocidad máxima no ambigua. Luego, se caracterizó estadísticamente el estimador afectado por la interferencia, y se evaluó la probabilidad de salto de velocidad. El resultado obtenido muestra que el efecto y la probabilidad de ocurrencia dependen de la ISR, el número de pulsos en el CPI, M, y de la suma de las fases de la señal y de la interferencia.

En segunda instancia, se realizaron una serie de simulaciones numéricas con un modelo de señal más realista, el cual surge de considerar una función gaussiana para

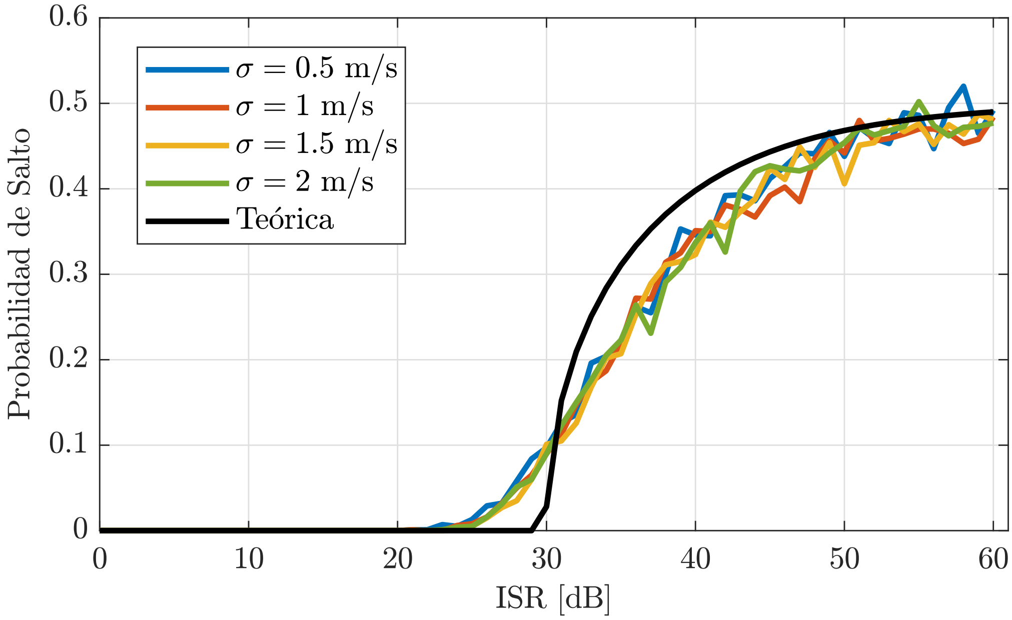


Figura 2.13: Probabilidad de salto en función de ISR calculada con un umbral fijo de saltos de velocidad de $0{,}5v_a$.

densidad espectral de potencia, a la que se fija un dado ancho espectral. La primera simulación realizada consistió en evaluar el sesgo y el error cuadrático medio del estimador de velocidad en función del ancho espectral para diferentes valores de ISR. Por un lado se observó que el sesgo da en torno al valor verdadero de la velocidad, es decir presenta un comportamiento insesgado, mientras que su dispersión se incrementa significativamente cuando la ISR aumenta. Para dar con la causa de este incremento en la dispersión, se analizaron los estimados individuales, donde se mostró que al igual que para el modelo analítico para algunos estimados se producen saltos de velocidad mientras que otros no se ven afectados o al menos el efecto no es tan significativo. Este comportamiento se va modificando a medida que el ancho espectral aumenta, llevando a una dispersión uniforme de los estimados para valores altos. Sin embargo, para los valores de ancho espectral habituales en la práctica el efecto de los saltos de velocidad es un comportamiento esperable.

Finalmente, se llevaron a cabo simulaciones con el propósito de estimar la probabilidad de salto. Para ello, fue necesario establecer un criterio para determinar un umbral que permita establecer cuándo existe un salto. Con este propósito se empleó una prueba de gaussianidad sobre los estimados basada en la curtosis, lo que permitió elegir un umbral óptimo, que cuando es superado por un estimado se considera que existe un salto de velocidad. Luego, se hizo variar la ISR y el ancho espectral y se evaluó la probabilidad de salto estimada como la frecuencia relativa. No obstante, debido a que la prueba de gaussianidad no siempre resulta efectiva, se realizó una evaluación simultánea de la probabilidad de salto para un umbral fijo de $0{,}5v_a$, independientemente

del valor de ISR y del ancho espectral. Para ambos umbrales se obtuvo un comportamiento similar al modelo analítico. Por un lado, los resultados arrojaron que, para la prueba de gaussianidad, el inicio de las detecciones de salto se da para valores más bajos de ISR. Por otro lado, para el caso de umbral fijo en $0{,}5v_a$, se observó que existe una menor dispersión al variar los anchos espectrales cuando la ISR se incrementa.

Capítulo 3

Detección de interferencia wifi a partir de la velocidad Doppler

En este capítulo se propone un algoritmo de detección de interferencia wifi en los registros de datos de un radar meteorológico, sobre la base del efecto de saltos que se producen en los estimados de la velocidad Doppler. Se parte de la explicación intuitiva de la idea que da lugar al detector y luego se describen los diferentes pasos que lo componen, sorteando las dificultades que se presentan propias de la aplicación. Posteriormente, se presenta un ejemplo detallado del funcionamiento del detector.

En la segunda parte del capítulo se incluye una serie de simulaciones numéricas, empleando datos sintéticos que se obtienen de los modelos propuestos en el capítulo previo, en las que se estudia el desempeño del algoritmo de detección tomando como métricas la probabilidad de falsa alarma y la probabilidad de detección. Se describen las rutinas implementadas y se presentas los resultados que surgen de considerar distintos escenarios en torno a cuatro situaciones de velocidad y diferentes combinaciones de parámetros de interés, tales como ancho espectral, de ISR y de SNR.

3.1. Algoritmo de detección

En esta sección se presenta un algoritmo de detección de interferencia wifi a partir del efecto de salto que la misma produce sobre la estimación de la velocidad. La idea es no utilizar todas las muestras dentro de cada CPI para estimar la velocidad. En su lugar se propone un esquema de procesamiento como el que se muestra en la Figura 3.1. Para un dado CPI, se define una ventana de $M_w < M$ muestras, representada en la figura a través de las celdas resaltadas en color verde, que se desplaza dentro del CPI seleccionando diferentes conjuntos de muestras y en cada posición se evalúa un estimado de la velocidad, dando como resultado un conjunto de estimados de velocidad $\hat{v}_1, \hat{v}_2, \cdots, \hat{v}_{M-M_w+1}$.

Bajo la hipótesis de que una única muestra del CPI puede estar afectada por interferencia, tal como se indica con la celda en color rojo en la figura, se espera que para aquellos CPIs interferidos solo los estimados de velocidad correspondientes a conjuntos de datos que contengan la muestra interferida podrán estar afectadas por el salto y el resto de los estimados tendrán valores de velocidad próximos al verdadero valor de velocidad. En el ejemplo de la figura se espera que $\hat{v}_1, \hat{v}_2, \cdots, \hat{v}_7$ y $\hat{v}_{16}$ sean aproximadamente v y $\hat{v}_8, \hat{v}_9, \cdots, \hat{v}_{15}$ sean aproximadamente $v \pm v_a$ o v, dependiendo de si la interferencia produce o no el salto de velocidad. Entonces, comparando los estimados dentro del CPI con un umbral determinado, existe la posibilidad de establecer si se está o no en presencia de un salto de velocidad y por ende en presencia de interferencia dentro del CPI.

Cabe remarcar que este procedimiento no permitirá detectar interferencia que esté afectando a las muestras de la señal cuando su efecto no produzca saltos de velocidad. Sin embargo, en términos de la velocidad Doppler esto no es un problema porque en tal caso la interferencia no afectaría la estimación.

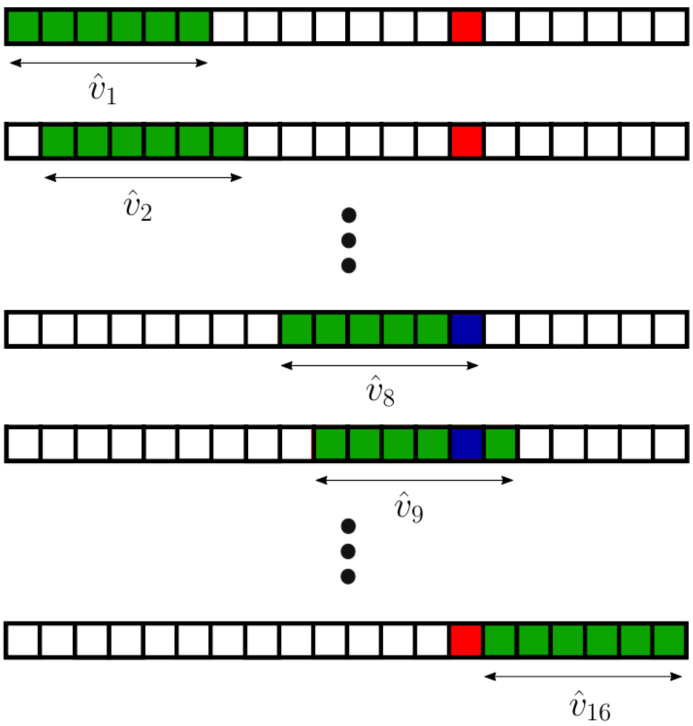


Figura 3.1: Esquema en el que se inspira la idea del detector de interferencia a partir de su efecto sobre la estimación de la velocidad Doppler.

El procedimiento formulado para abordar la detección de interferencia posee la dificultad de que requiere conocer el verdadero valor de la velocidad. Dado que por un lado este valor se desconoce, porque es justamente lo que se busca estimar, y por otro lado si se utilizara la estimación de PPP en base a todas las muestras del CPI, esta estimación podría resultar afectada por la interferencia que se busca detectar, se utiliza

el valor de la mediana del conjunto de estimados obtenidos con la ventana deslizante y se lo denota como $\hat{v}$.

Una vez hallado el valor de velocidad el siguiente problema es definir los umbrales de decisión. Aquí se deben hacer dos aclaraciones con respecto al trabajo realizado en el Capítulo 2. En primer lugar, para obtener estos umbrales no se utiliza la prueba de gaussianidad, debido a que depende del ancho espectral de la señal y la ISR, parámetros que no se conocen de antemano y además de que para anchos espectrales mayores no arroja resultados esperados. En su lugar, se opta por tomar umbrales fijos.

En segundo lugar, en los análisis previos se consideró siempre que $v = 0$ m/s, mientras que en este caso se supone una condición más general en la que v no necesariamente es cero. Con esta consideración, los umbrales para determinar si hubo o no saltos se definen en principio en $\pm v_a/2$ respecto de $\hat{v}$. En rigor, esto último es estrictamente válido cuando esos umbrales no superen en módulo el valor de v_a. Esta situación se desarrollará en la descripción detallada del algoritmo.

En la Figura 3.2 se presenta un diagrama de flujo del algoritmo. En resumen, se toma como entrada al algoritmo un conjunto de muestras que integran un CPI, y las etapas que conforman el procedimiento de detección se describen a continuación.

1. Estimar la velocidad Doppler con ventana deslizante. Tomando una ventana de $M_w < M$ muestras que se desplaza de a una muestra, se estima en cada paso la velocidad Doppler media empleando el método de estimación PPP dado por (2.5). Con este procedimiento se obtiene un conjunto de estimados $\hat{v}_1, \hat{v}_2, \cdots, \hat{v}_{M-M_w+1}$, de los cuales podría haber un subconjunto del tamaño de la ventana que se encuentre afectado por un salto y el resto se espera que posean valores próximos al verdadero valor de velocidad.

2. Evaluar la mediana de los estimados de velocidad. Existen tres posibles situaciones para los estimados: ninguno presenta salto de velocidad porque no existe interferencia, ninguno presenta salto de velocidad porque existe interferencia pero su efecto no se manifiesta, algunos de los estimados presentan saltos de velocidad debido a que existe interferencia y se manifiesta su efecto. Considerando que si se ordenan de mayor a menor los estimados, aquellos en los que existan saltos de velocidad se ubicarán en los extremos, para contar con un valor de velocidad que permita determinar los umbrales se evalúa la mediana estadística y se obtiene $\hat{v}$.

3. Determinar los umbrales de decisión. En los estudios realizados en las secciones 2.3.4 y 2.3.5 el umbral de decisión se consideró simétrico respecto a la velocidad cero, que fue el valor verdadero de velocidad fijado para las simulaciones. En una situación práctica en la que la velocidad pueda tomar un va-

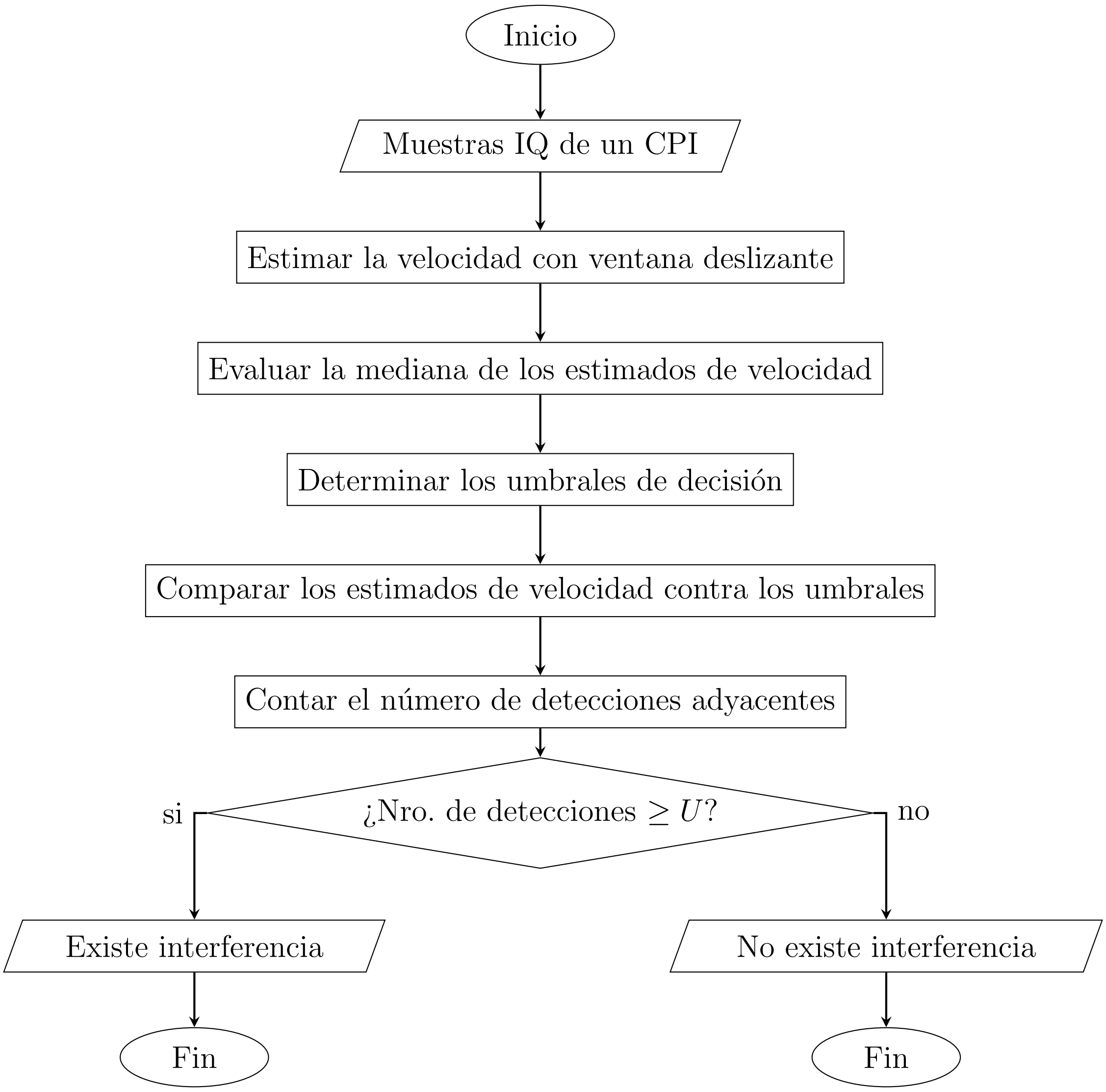


Figura 3.2: Esquema del algoritmo de detección de interferencia wifi a partir de los saltos en la velocidad Doppler.

lor arbitrario $v \approx \hat{v}$, en principio los umbrales de decisión serán $\hat{v} \pm v_a/2$. Sin embargo, teniendo en cuenta que el rango de valores de velocidad no puede superar en módulo la máxima velocidad no ambigua, v_a, en aquellos casos en que $\hat{v} + v_a/2 > v_a$ o $\hat{v} - v_a/2 < -v_a$ los valores de los umbrales deben ser llevados al intervalo $[-v_a, v_a]$. Este efecto es consecuencia de que la velocidad se estima a partir de la fase y es análogo al efecto de replicado que surge con el muestreo de señales. Denotando como v_s y v_i a los umbrales superior e inferior, de acuerdo a la situación que se presente, los mismos se definen como:

- cuando $\hat{v} + v_a/2 < v_a$ y $\hat{v} - v_a/2 > -v_a$ entonces

$$v_s = \hat{v} + v_a/2 \tag{3.1}$$
$$v_i = \hat{v} - v_a/2, \tag{3.2}$$

- cuando $\hat{v} + v_a/2 > v_a$ y $\hat{v} - v_a/2 > -v_a$ entonces

$$v_s = \hat{v} - v_a/2 \tag{3.3}$$
$$v_i = \hat{v} + v_a/2 - 2v_a, \tag{3.4}$$

- cuando $\hat{v} + v_a/2 < v_a$ y $\hat{v} - v_a/2 < -v_a$ entonces

$$v_s = \hat{v} - v_a/2 + 2v_a \tag{3.5}$$
$$v_i = \hat{v} + v_a/2. \tag{3.6}$$

4. Comparar los estimados de velocidad contra los umbrales. Cada uno de los estimados, $\hat{v}_n$ con $n = 1, 2, \cdots, M - M_w + 1$, obtenidos en el primer paso del algoritmo, se compara con los umbrales de decisión del punto anterior y se establece que un estimado está afectado por un salto de velocidad cuando:

   - $-v_a/2 < \hat{v} < v_a/2$ y se satisface que $\hat{v}_n > v_s$ o $\hat{v}_n < v_i$, donde las definiciones de v_s y v_i son (3.1) y (3.2), respectivamente.
   - $\hat{v} > v_a/2$ y se satisface que $v_i < \hat{v}_n < v_s$, donde las definiciones de v_s y v_i son (3.3) y (3.4), respectivamente.
   - $\hat{v} < -v_a/2$ y se satisface que $v_i < \hat{v}_n < v_s$, donde las definiciones de v_s y v_i son (3.5) y (3.6), respectivamente.

5. Contar el número de detecciones adyacentes. Para evitar falsas detecciones la decisión final sobre la existencia de interferencia no se toma a partir de los resultados del punto anterior. Teniendo en cuenta que se utiliza una ventana deslizante para obtener los estimados se espera que los estimados que se obtuvieron con la muestra de interferencia contenida en la ventana se encuentren afectados por un salto. Por este motivo, en pos de reducir el número de falsas detecciones de la prueba, antes de tomar la decisión se aplica una segunda prueba que consiste en contar el número de detecciones en estimados adyacentes y comparar dicho número de detecciones con un umbral U, cuyo valor debe estar relacionado con el largo de la ventana considerada.

6. Establecer la existencia o no de interferencia. Finalmente si en el CPI se verifica que existe un conjunto de estimados adyacentes que presentan

Parámetro	Símbolo	Valor
Frecuencia de portadora	f_c	5,62 GHz
Longitud de onda	λ	5,36 cm
PRI	T	1 ms
Velocidad no ambigua	v_a	13,33 m/s
Potencia	S_p	1 [U.A.]
Velocidad Doppler media	v	$-3{,}5$ m/s
Ancho espectral	σ_p	1 m/s
Nro. de pulsos del CPI	M	64
Largo de la ventana	M_w	8
Relación señal a ruido	SNR	5 dB
Relación interferencia a señal	ISR	5 dB
Umbral inferior	v_i	$-10{,}40$ m/s
Umbral superior	v_s	2,92 m/s

Tabla 3.1: Parámetros para la generación de datos del análisis de funcionamiento del detector.

saltos de velocidad, cuyo número es mayor o igual a U se establece que existe interferencia en el CPI bajo prueba. Caso contrario, se establece que no existe interferencia en el CPI bajo prueba.

3.2. Análisis de funcionamiento del detector

Con el objetivo de ilustrar el funcionamiento de las distintas etapas del algoritmo de detección, se genera una realización de la señal recibida por el radar el cual se compone de contribuciones de un fenómeno meteorológico modelado por medio de un proceso aleatorio gaussiano, con DEP también gaussiana tal como se describió a través de (2.27), más ruido blanco gaussiano. Se considera un CPI de 64 muestras y en una de ellas se suma la componente de interferencia tal que la ISR resulte 5 dB, siguiendo el modelo propuesto en la Sección 2.1. En la Tabla 3.1 se resumen todos los parámetros de la generación de la señal y de configuración del detector. En la Figura 3.3 se muestra la realización de la señal generada, en sus partes real (componente en fase) e imaginaria (componente en cuadratura). Se incluye la señal sin interferencia y la versión con interferencia. Dichas curvas se encuentran superpuestas a excepción de una muestra, que corresponde al pulso que se modeló como interferido.

En la Figura 3.4 se presentan los resultados obtenidos al aplicar las primeras cuatro etapas del algoritmo de detección. La figura se encuentra dividida en dos subfiguras. En la de la parte superior se observan los estimados de velocidad, $\hat{v}_n$ correspondientes

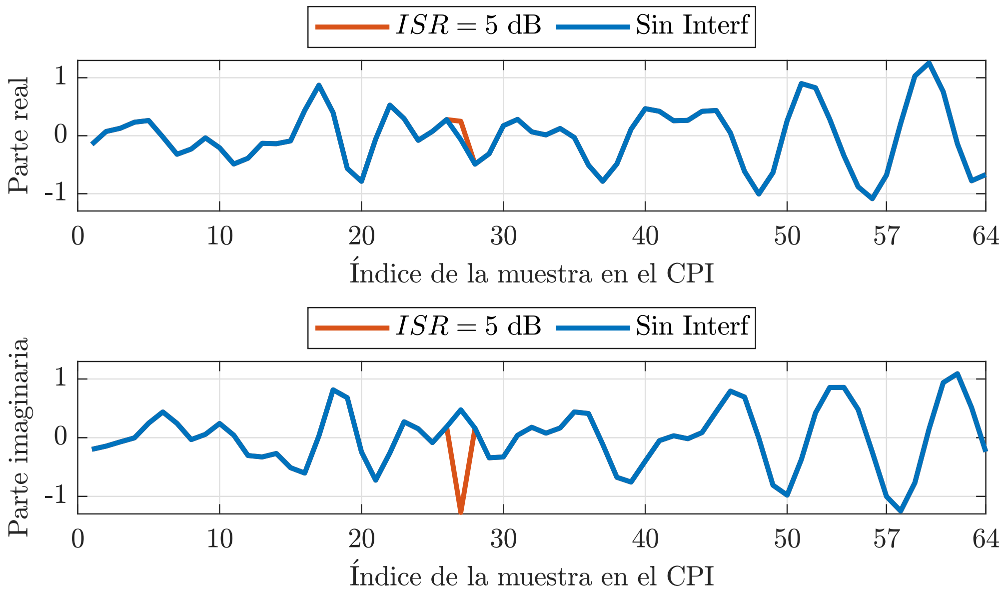


Figura 3.3: Parte real e imaginaria de la señal correspondiente a un CPI.

al paso 1, junto con los umbrales superior e inferior evaluados en el paso 3. Para la etapa de estimación de velocidad se utiliza una ventana de longitud $M_w = 8$, y teniendo en cuenta que $M = 64$ el número total de estimados de velocidad es 57. La elección de $M_w = 8$ se mantiene a lo largo del trabajo. Para cada segmento se hace el procedimiento habitual de estimación de la velocidad Doppler mediante PPP y luego se calcula la mediana en lo que conforma el paso 2 del algoritmo. En este caso particular, la mediana es de $\hat{v} = -3{,}74$ m/s, lo que indica que se está en la primera situación para la elección de umbral (en la que no se presenta efecto de replicado).

En la figura de la parte inferior de la Figura 3.4, se observa el resultado obtenido luego de la primera prueba de detección correspondiente al paso 4 del algoritmo, en la que se comparan los valores de los estimados con los umbrales determinados. La secuencia $d_1[n]$ representada en este gráfico es una bandera (*flag* en inglés) por cada uno de los estimados, la que toma el valor 0 cuando se indica que ese estimado no se encuentra afectado por interferencia y toma el valor 1 cuando se establece que existe interferencia. En los resultados se observa que los índices entre 20 y 27 se encuentran en 1 mientras los restantes toman el valor 0. Cabe mencionar que los índices 20 al 27 corresponden a las ubicaciones de los estimados afectados por la interferencia, de acuerdo con su ubicación tal como se muestra en la Figura 3.3.

Para garantizar un buen rendimiento en el algoritmo de detección frente a la acción del ruido, se ha implementado una etapa de decisión adicional, que corresponde al paso 5 del algoritmo. Este paso consiste, simplemente, en contar el número de detecciones adyacentes del paso 4. Esta etapa se implementó por medio de una convolución entre la salida del paso 4 y una secuencia rectangular de amplitud 1 y ancho fijo igual

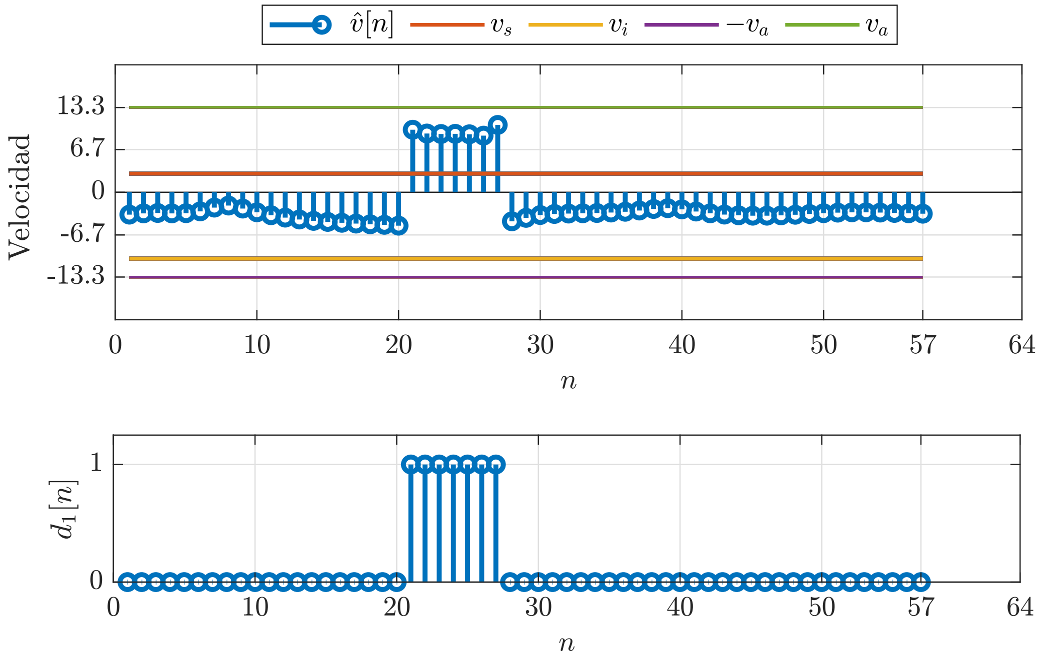


Figura 3.4: Estimados de velocidad y salida de la primera prueba de detección.

a 6 muestras. Adicionalmente, debido a que se considera la convolución sin efectos transitorios, se remueven 2 muestras de cada extremo de la convolución resultando a la salida de esta etapa en 53 muestras válidas.

Los resultados de está etapa se presentan en la Figura 3.5, la cual también se compone de dos subfiguras. En la de la parte superior se muestra la salida de la convolución, mientras que en la de la parte inferior se observa salida de la segunda etapa de detección, $d_2[n]$, que se obtiene de la comparación el resultado de la convolución y el umbral U. En este caso se eligió $U = 4$. La secuencia $d_2[n]$ es una bandera que tiene el valor 1 en aquellas ubicaciones que se encuentran al menos U detecciones adyacentes de la detección previa y 0 en caso contrario. La decisión arroja que se detectaron de forma positiva los índices 19 hasta 24 en términos del paso 5, que corresponden a los índices n de los estimados de 20 hasta 27 y $m = 27$ del CPI. Este ejemplo muestra que el detector ha sido capaz de identificar los cambios en la velocidad debido al efecto de la interferencia en los puntos específicos donde se manifestaron.

3.3. Análisis de desempeño del detector

Con el objetivo de evaluar el desempeño del detector, en esta sección se desarrollan una serie de simulaciones numéricas, en las que se miden la probabilidad de falsa alarma, P_{FA}, y probabilidad de detección, P_D. Estas métricas de desempeño se evalúan en función de la SNR y de la ISR, teniendo en cuenta, además, otros factores que afectan a la detección, como ser diferentes situaciones de velocidad Doppler media y de ancho

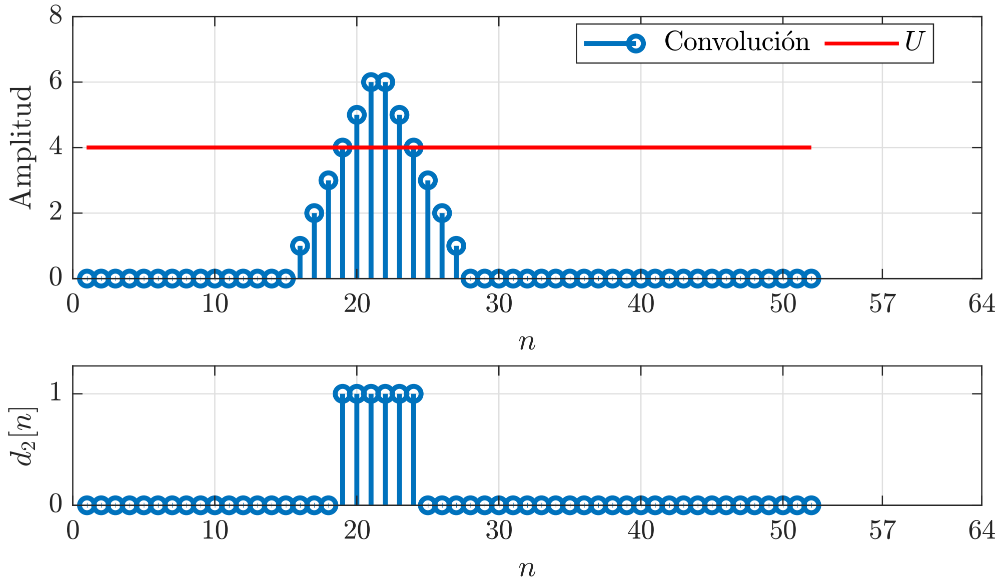


Figura 3.5: Convolución y salida de la segunda prueba de detección.

espectral del fenómeno meteorológico.

Antes de detallar como se realizan las pruebas sobre el detector, es importante describir las diferentes situaciones de velocidad Doppler media que se consideran.

1. Velocidad igual a cero y conocida. Esta situación es la más sencilla en términos de complejidad de implementación, debido a que el valor de velocidad Doppler media se fija en cero y es conocida por el detector. Por lo tanto, no requiere estimar su valor empleando la mediana en el paso 2 del algoritmo. Además, teniendo en cuenta que el valor de velocidad está comprendido entre $-v_a/2$ y $v_a/2$, los umbrales están fijos de antemano y tampoco requiere clasificar la situación para la determinación y uso de los umbrales, es decir también se omite el paso 3 y se cae en la primera situación del paso 4.

2. Velocidad con valor arbitrario y conocida. En esta situación la velocidad Doppler media puede tomar cualquier valor en el intervalo comprendido entre $-v_a$ y v_a. Sin embargo, su valor es conocido en el detector. Por lo tanto, tampoco requiere estimar su valor empleando la mediana en el paso 2 del algoritmo, pero a diferencia de la situación previa, es necesario ejecutar el paso 3 para determinar los umbrales y realizar la clasificación previo a la detección en el paso 4.

3. Velocidad igual a cero y desconocida. El valor de velocidad Doppler media se fija en cero como en la primera situación, pero es desconocida por el detector. En este caso, si bien la condición sobre la velocidad no es del todo realista, la operación del detector si lo es, ya que se deben ejecutar todas las etapas del algoritmo de detección que se resumen en la Figura 3.2.

4. Velocidad con valor arbitrario y desconocida. Esta es la situación más realista desde el punto de vista práctico, y resulta la más compleja en términos de la implementación del detector. La velocidad Doppler media puede tomar cualquier valor en el intervalo comprendido entre $-v_a$ y v_a y, además, el detector desconoce su valor. En este caso se deben ejecutar todas las etapas del algoritmo de detección que se resumen en la Figura 3.2.

3.3.1. Descripción de las implementaciones

Probabilidad de falsa alarma

La probabilidad de falsa alarma mide la tasa de detecciones que posee el detector cuando no existe interferencia presente, es decir cuando se presenta una de las formas de equivocarse en la decisión. En esta sección se describe la rutina implementada para estimar P_{FA}, la cual admite distintas condiciones de ruido, velocidades (cero o aleatoria) y anchos espectrales. Cabe mencionar que para cubrir las distintas situaciones de velocidad planteadas en la sección previa, posee la opción de evaluar la prueba con velocidad conocida o estimada, ya sea proporcionando o no la velocidad en la etapa de determinación de umbrales.

En la Figura 3.6 se presenta el diagrama de flujo de la rutina para evaluar P_{FA} en función de SNR. Se define un contador de realizaciones, I, y un contador de detecciones, D, que son ambos fijados a cero al iniciar la prueba. A continuación, se genera una realización del fenómeno meteorológico, $p[m]$, modelado por medio de un proceso aleatorio gaussiano, con DEP también gaussiana. La función de generación admite configurar los parámetros v y σ. El paso siguiente consiste en sumar ruido blanco gaussiano, $n[m]$. Cabe remarcar que como se está evaluando probabilidad de falsa alarma en esta experiencia no se adiciona interferencia. A partir de este punto se inicia el proceso de detección de saltos en la velocidad mediante el uso del algoritmo de detección, siguiendo los pasos descriptos en la Sección 3.1, a excepción de los pasos 2 y/o 3 en algunas de las situaciones de velocidad planteadas.

Este proceso de generación de la señal y de ejecución del algoritmo de detección se repite iterativamente. En cada iteración se incrementa en 1 el contador de realizaciones I, y en aquellas iteraciones en que se detecta un salto de velocidad se incrementa en 1 el contador de detecciones D. El procedimiento se repite hasta alcanzar un número máximo de detecciones D_{max} elegido convenientemente para que la estimación de P_{FA} sea aceptable. Una vez que finaliza la ejecución, la probabilidad de falsa alarma se estima como

$$P_{FA} = \frac{D}{I}. \tag{3.7}$$

Probabilidad de detección

La probabilidad de detección mide la tasa de detecciones de interferencia cuando la misma está presente. En esta sección se describe la rutina implementada para estimar P_D, que al igual que para la probabilidad de falsa alarma, admite distintas condiciones de ruido, velocidades (cero o aleatoria) y anchos espectrales.

Antes de abordar la descripción, es importante mencionar que el algoritmo de detección de interferencia se basa en detectar los saltos de velocidad cuando los mismos se manifiestan. Sin embargo, en el análisis de la Sección 2.2.1 se arribó a la conclusión que aún en los casos de ISR alta solo el 50 % de las veces que existe interferencia presente, ésta se manifiesta como un salto de velocidad. Es decir, que si el salto no se manifiesta el detector no identificará la presencia de interferencia. Por ese motivo, al momento de evaluar P_D no cualquier realización de la señal es válida, solo se deben tener en cuenta aquellas realizaciones en las que el salto se manifiesta para evaluar si el detector es capaz de identificar su presencia frente al efecto del ruido.

En la Figura 3.7 se presenta el diagrama de flujo de la rutina para evaluar P_D en función de SNR y de ISR. Se define un contador de realizaciones, I, y un contador de detecciones, D, que al iniciar la prueba ambos son fijados en cero. Inicialmente, se ejecutan una series de pasos para determinar si la señal a analizar presenta un salto de velocidad. Como primera etapa, se genera el fenómeno meteorológico, $p[m]$, modelado por medio de un proceso aleatorio gaussiano, con DEP también gaussiana, la función de generación admite configurar los parámetros v y σ. Luego, se genera la señal de interferencia $i[m]$ siguiendo el modelo presentado en la Sección 2.1.1 para un dado valor de ISR y se suma a $p[m]$.

En este punto, con la presencia solo de señal más interferencia, se ejecuta la secuencia de pasos de la detección de saltos en la velocidad, a excepción de los pasos 2 y/o 3 en algunas de las situaciones de velocidad planteadas. En el caso en que la interferencia no produzca salto en la velocidad, se genera una nueva realización de fenómeno meteorológico, $p[m]$, e interferencia y se repite el proceso de detección de salto. En cambio, cuando la interferencia produce el salto de velocidad, se almacena la secuencia lógica $d_{21}[n]$ a la salida de la segunda instancia de decisión, correspondiente al paso 5, y el contador I se incrementa en 1. En la segunda etapa, se suma ruido blanco gaussiano, $n[m]$, a la señal compuesta de fenómeno más interferencia, y luego se inicia, nuevamente, el proceso de detección de saltos en la velocidad mediante el uso del algoritmo de detección, a excepción de los pasos 2 y/o 3 en algunas de las situaciones de velocidad planteadas.

A diferencia de lo que hizo para la probabilidad de falsa alarma, aquí la decisión final no se toma solo con la secuencia lógica $d_{22}[n]$ a la salida de la segunda instancia de decisión, debido a que puede existir una falsa detección en una posición dentro del

CPI diferente a la de la ubicación de la interferencia. Por este motivo, se hace uso de $d_{21}[n]$, que contiene la ubicación de los saltos detectados sin la presencia de ruido, en conjunto con $d_{22}[n]$ para tomar la decisión final. Para ello, se define una tercer secuencia lógica $d_3[n]$ que resulta de la operación *and* (denotada con el símbolo & en la Figura 3.7) entre $d_{21}[n]$ y $d_{22}[n]$ y se evalúa si en alguna posición existe un 1. En caso de que resulte afirmativo se incrementa en 1 el contador D y se comienza con una nueva iteración. Caso contrario, se da inicio a una nueva iteración sin incrementar D. El procedimiento se repite hasta alcanzar un número máximo de detecciones D_{max} elegido convenientemente para que la estimación de P_D sea aceptable. Una vez que finaliza la ejecución, la probabilidad de detección se estima como

$$P_D = \frac{D}{I}. \tag{3.8}$$

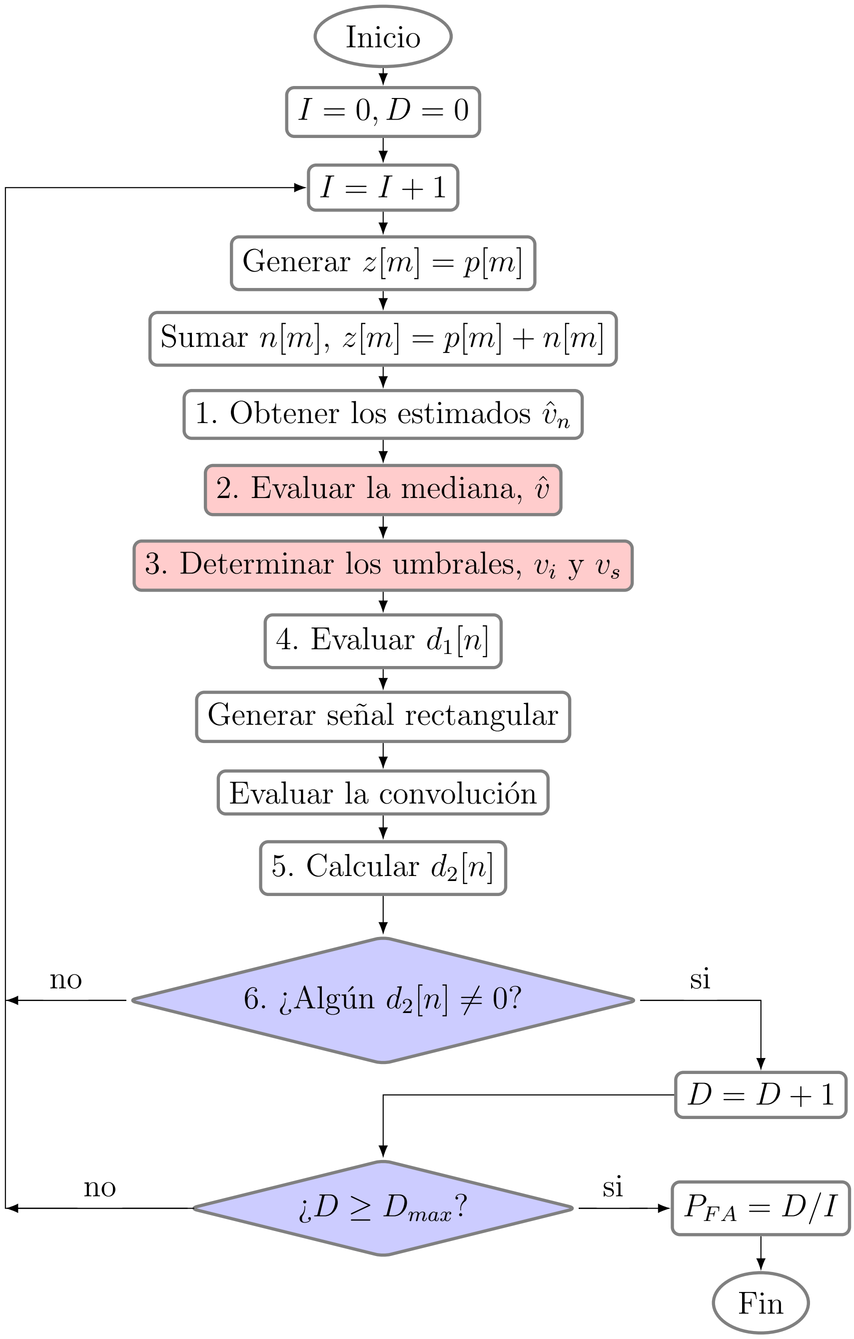


Figura 3.6: Diagrama de flujo de la rutina que evalúa la probabilidad de falsa alarma en función de SNR.

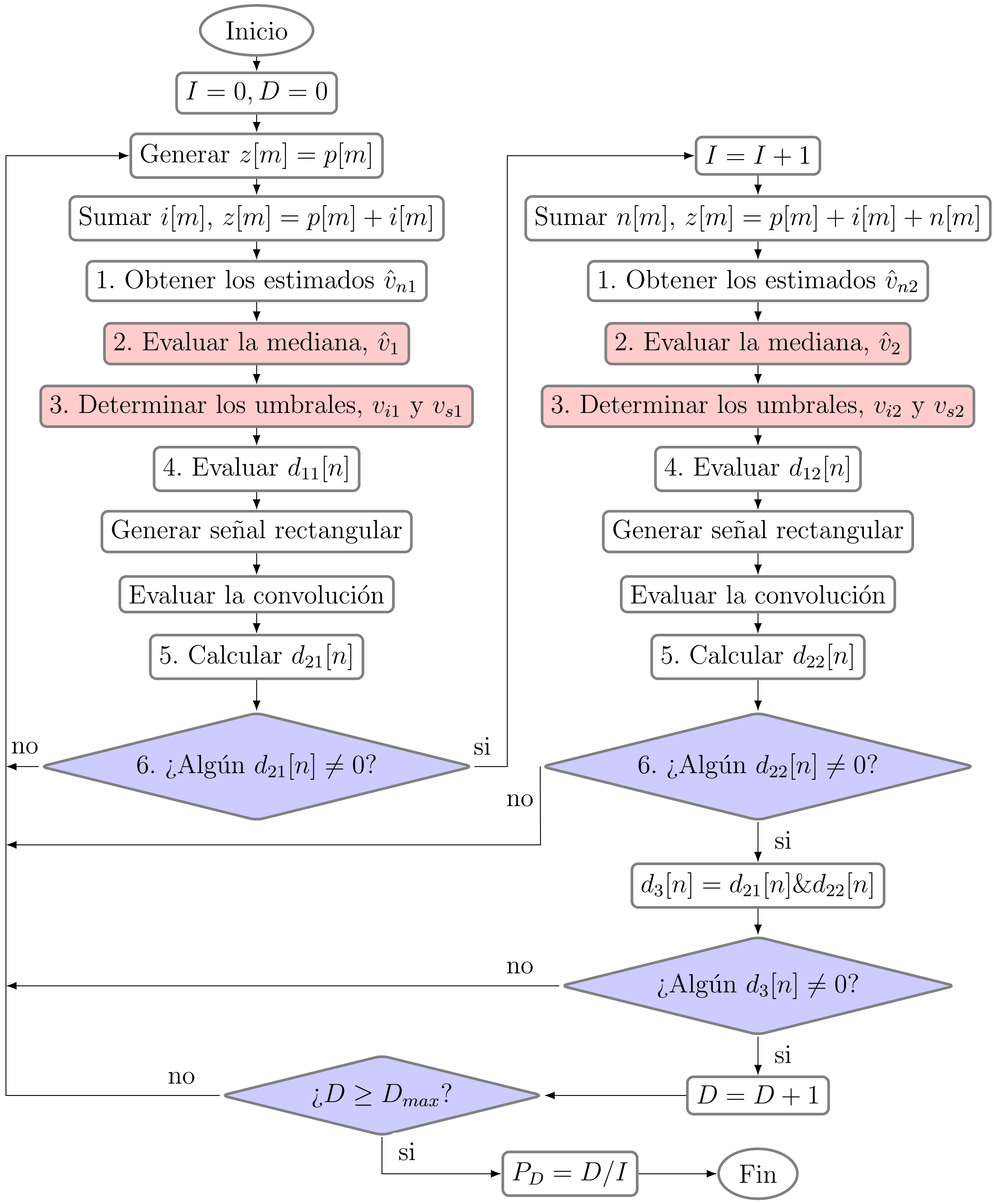


Figura 3.7: Diagrama de flujo de la rutina que evalúa la probabilidad de detección en función de SNR y de ISR.

Parámetro	**Símbolo**	**Valor**
Frecuencia de portadora	f_c	5,62 GHz
Longitud de onda	λ	5,36 cm
PRI	T	1 ms
Velocidad no ambigua	v_a	13,33 m/s
Potencia	S_p	1 [U.A.]
Nro. de pulsos del CPI	M	64
Largo de la ventana	M_w	8

Tabla 3.2: Parámetros para las simulaciones correspondientes al análisis de desempeño del detector.

3.3.2. Resultados de las simulaciones numéricas

Empleando las rutinas descriptas en la sección previa se realizaron una serie de experiencias que consisten en evaluar P_{FA} y P_D en diferentes condiciones de operación. En la Tabla 3.2 se presentan los parámetros de configuración generales, que se mantienen fijos para todas las simulaciones. Cabe mencionar que en aquellas simulaciones en las que se evalúa P_{FA} se utiliza $D_{max} = 500$, y en las que se evalúa P_D se fija $D_{max} = 5000$. Estos valores se definieron para lograr curvas relativamente suaves y que el costo computacional de la simulación no sea extremadamente grande. El resto de los parámetros se especifican en cada experiencia particular.

Estimación de P_{FA} para la situación 3 de velocidad

La primera experiencia consiste en evaluar la probabilidad de falsa alarma del detector con $v = 0$ m/s y desconocida en el detector, con lo cual debe ser estimada a partir de la mediana en el paso 2 del algoritmo. El estudio se realiza en función de la SNR y se repite la simulación para diferentes anchos espectrales, específicamente σ toma los valores 0,5, 1, 1,5 y 2 m/s. La idea de esta experiencia es analizar el desempeño del detector en función de SNR y σ, en una condición favorable para la estimación de la mediana de la velocidad, y evitando en la medida de lo posible cuestiones relacionadas con la elección de los umbrales en en paso 3. Como veremos más adelante, esta estimación presenta errores mayores para valores altos de velocidad debido al efecto de replicado y esto por supuesto afecta la determinación de los umbrales.

En la Figura 3.8 se muestran los resultados de la simulación. Con respecto a la variación de P_{FA} con SNR, cabe mencionar que el comportamiento es el esperado, debido a que este detector presenta umbrales fijos, es decir no son función de la varianza del ruido como ocurre por ejemplo en un detector CFAR, cuando SNR toma valores pequeños la P_{FA} es mayor y disminuye a medida que SNR se incrementa. Por otro

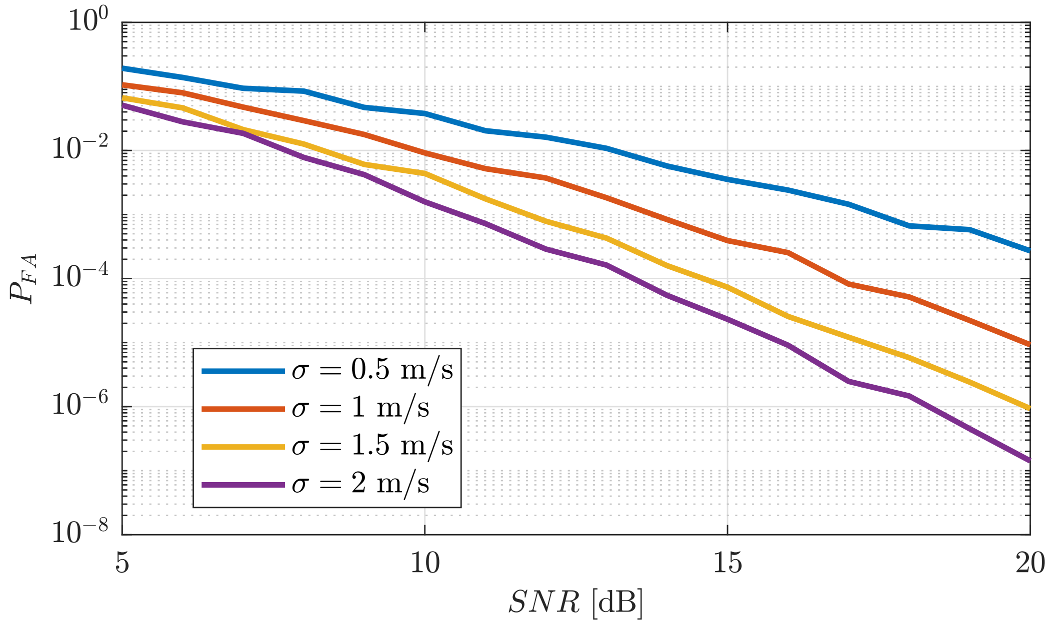


Figura 3.8: Probabilidad de falsa alarma en función de la SNR para diferentes valores de ancho espectral, con $v = 0$ m/s, desconocida y es estimada por medio de la mediana.

lado, se observa que existen apartamientos significativo entre las curvas de P_{FA} para los distintos de valores de ancho espectral y que la separación es mayor a medida que la SNR aumenta. Por ejemplo, para $SNR = 20$ dB y $\sigma = 0{,}5$ m/s la probabilidad está en el orden de 10^{-4}, mientras que para $\sigma = 2$ m/s está en el orden de 10^{-7}.

Una posible explicación de este comportamiento surge a partir de la correlación de la señal para cada ancho espectral. Cuando σ es menor, la correlación temporal de la señal es mayor lo que puede llevar a que en el paso 4 se produzca un mayor número de detecciones falsas adyacentes. Esto también explica porqué la separación entre curvas es mayor para SNR mayor. Cuando el ruido domina el comportamiento de la señal, SNR baja, los valores de P_{FA} para distintos valores de σ son comparables. En cambio cuando el comportamiento de la señal es dominado por la componente correspondiente al objetivo meteorológico, SNR alta, los valores de P_{FA} para distintos valores de σ se apartan, indicando que esa diferencia responde al efecto del objetivo meteorológico y no al del ruido.

Comparación de P_{FA} entre las cuatro situaciones de velocidad

En la segunda experiencia de P_{FA} se consideran las cuatro situaciones de velocidad que se describieron: $v = 0$, conocida; $v = 0$, desconocida; v aleatoria, conocida; y v aleatoria, desconocida. Cuando la velocidad es aleatoria, para cada realización su valor se obtiene a partir de una variable aleatoria con distribución uniforme entre $-v_a$ y v_a. Además, se establece un ancho espectral fijo en 1 m/s y se evalúa P_{FA} en función de SNR, en el rango de 5 a 20 dB. Con esta simulación se prevé comparar la sensibilidad de

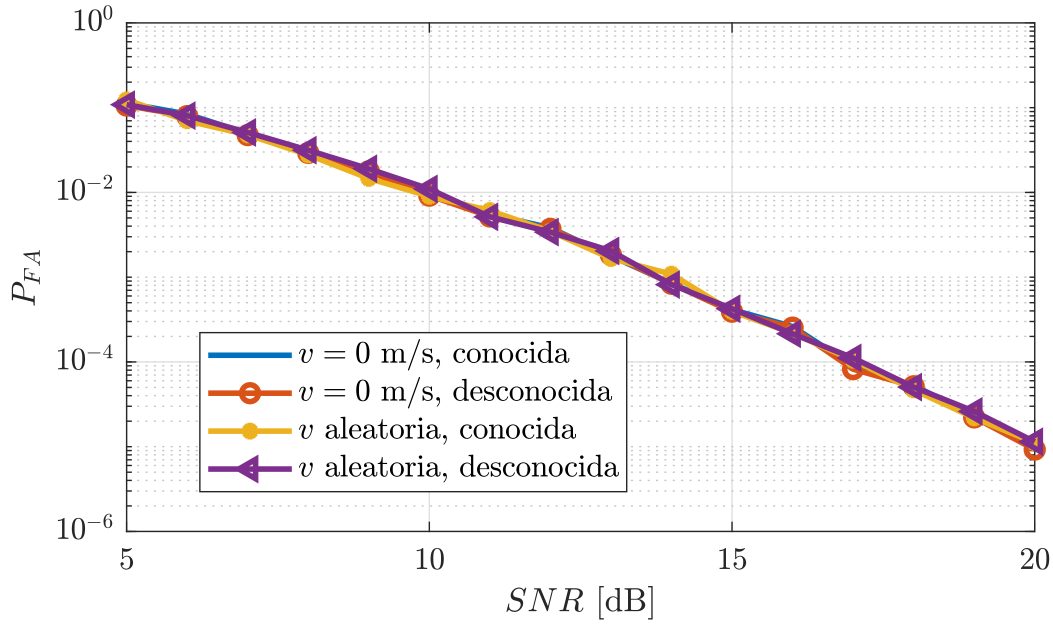


Figura 3.9: Probabilidad de falsa alarma en función de la SNR para diferentes situaciones de velocidad, con ancho espectral fijo en 1 m/s.

la probabilidad de falsa alarma a las etapas de estimación de la velocidad empleando la mediana y de determinación de los umbrales. Por este motivo se comparan situaciones de velocidad conocida y desconocida, y con valor cero o arbitrario.

En la Figura 3.9 se presenta el resultado de la simulación. Se observa que las cuatro curvas de P_{FA} se encuentran superpuestas, y en función de la SNR poseen el mismo comportamiento que la simulación anterior. Este resultado indica que los errores que surgen de la utilización de la mediana no afectan de manera significativa a la probabilidad de falsa alarma y además permiten validar que la lógica de determinación de los umbrales, detallada en el paso 3 de la descripción del algoritmo, funciona correctamente.

Estimación de P_{FA} en función de la velocidad

El análisis previo arrojó que la P_{FA} es robusta frente a los errores en la estimación de la velocidad con la mediana. Sin embargo, es de esperar que a medida que el valor de la velocidad se incremente esta forma de estimar la velocidad presente problemas debido al efecto de replicado o como se conoce en radar, por la ambigüedad Doppler. En pos de estudiar en mayor detalle el efecto de utilización de la mediana en la estimación de la velocidad, se opta por fijar SNR en 15 dB, el ancho espectral en 1,5 m/s y se evalúa P_{FA} en función de la velocidad, en el intervalo entre $-v_a$ y v_a. Para cada valor de velocidad se consideraron las situaciones 2 y 3, es decir, con valores arbitrarios, conocidos y desconocidos. Cuando v es conocida, no se realiza la estimación mediante la mediana, y se tomará como referencia a los fines comparativos.

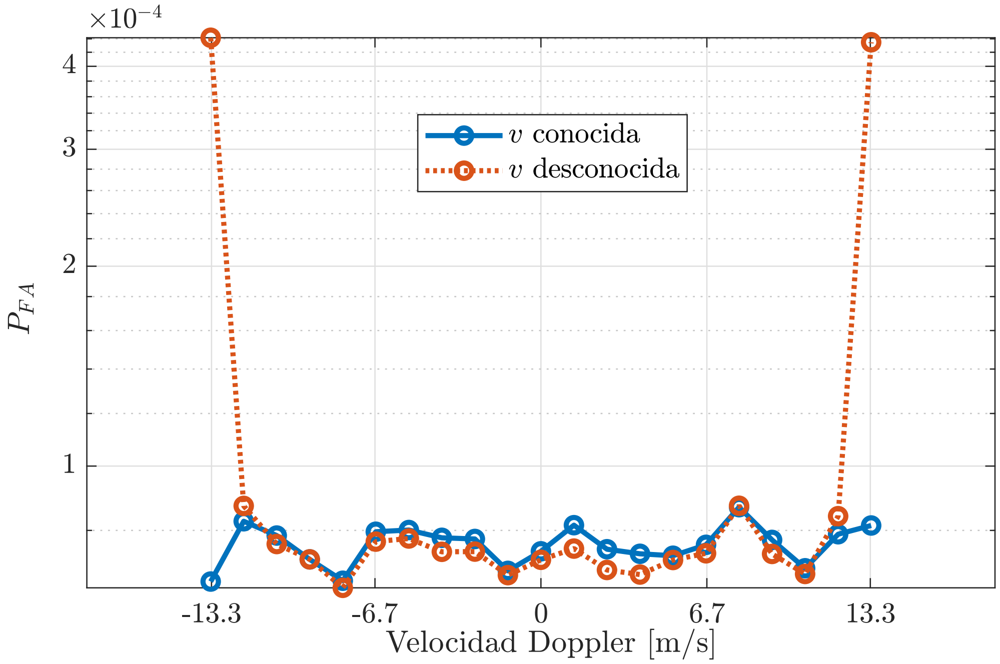


Figura 3.10: Probabilidad de falsa alarma en función de la velocidad Doppler, con $SNR = 15$ dB y $\sigma = 1{,}5$ m/s, para las situaciones 2 y 4 de velocidad.

En la Figura 3.10 se presentan los resultados obtenidos. El primer punto a destacar es que en la mayor parte del rango de velocidades ambas curvas de P_{FA} se mantienen aproximadamente constantes en un valor ligeramente por debajo de 10^{-4}, lo cual se condice con el valor que toma la P_{FA} para $SNR = 15$ dB y $\sigma = 1{,}5$ m/s en la Figura 3.8. Por otro lado, el comportamiento de la P_{FA} cuando v es desconocida es similar al de la P_{FA} cuando v es conocida, salvo en los valores extremos de velocidad, $v = -v_a$ y $v = v_a$. En esos puntos, la P_{FA} para el caso v desconocida se aparta del valor cercano a 10^{-4} y toma valores mayores que cuando v es conocida. Para estos valores extremos de velocidad, los estimados obtenidos en el paso 1 del algoritmo son más propensos a ser afectados por el efecto de replicado, esto es, valores que serían muy grandes de signo positivo se estimarían como valores muy grandes de signo negativo, y viceversa. Entonces, la mediana podría tomar valores lejanos al verdadero valor de la velocidad y por lo tanto se vería afectada la determinación de los umbrales en el paso 3 y la decisión en el paso 4. Lo interesante del resultado obtenido es que este efecto se limita a los valores de $v = -v_a$ y $v = v_a$. Es decir, esto refuta la hipótesis que llevó a realizar este estudio, en la cual se planteó que la diferencia entre las curvas de P_{FA} cuando v es desconocida se iría apartando de la de P_{FA} para v conocida a medida que el v se incrementara. Asimismo, este efecto no se aprecia en la Figura 3.9 debido a que en ese caso P_{FA} se obtuvo de promediar resultados para distintos valores de velocidad, obtenidos de forma aleatoria y, en el mejor de los casos, solo unos pocos han caído en valores de velocidad $-v_a$ y v_a.

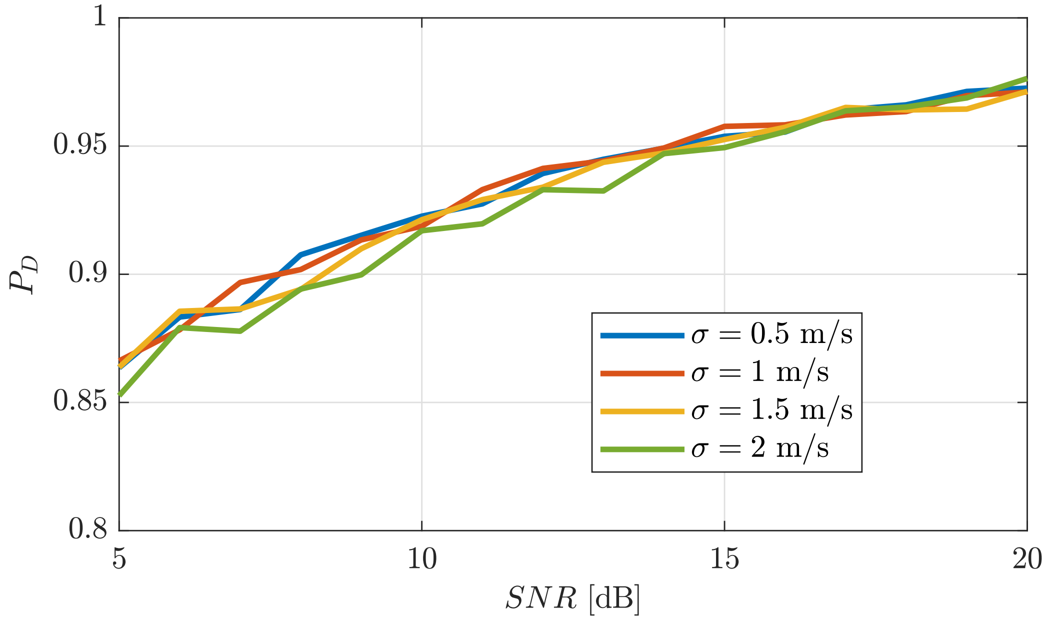


Figura 3.11: Probabilidad de detección en función de la SNR para diferentes valores de ancho espectral, con v arbitraría y desconocida, e $ISR = 30$ dB.

Estimación de P_D en la situación 4 de velocidad

En pos de completar el estudio de desempeño del detector se incorpora la interferencia en la señal y se evalúa la probabilidad de detección. La cuarta experiencia consiste en medir P_D en función de la SNR, para los anchos espectrales 0,5, 1, 1,5 y 2 m/s. Además, se considera v arbitraria y desconocida en el detector, con lo cual debe ser estimada a partir de la mediana en el paso 2 del algoritmo. Asimismo, la ISR se mantiene fija en 30 dB, que a partir de los resultados presentados en la Figura 2.13 es un valor que garantiza la existencia de saltos de velocidad.

En la Figura 3.11 se presentan los resultados de la simulación. En primer lugar, cabe destacar que la variación de la P_D con la SNR es la esperada, la probabilidad de detección se incrementa a medida que aumenta la SNR, es decir, la detección mejora a medida que la influencia del ruido disminuye. Por otro lado, se aprecia que no existen variaciones significativas entre las curvas de P_D correspondientes a los diferentes valores de σ.

Influencia de la ISR sobre la P_D

El objetivo de la quinta simulación es analizar el efecto que poseen los cambios en la intensidad de interferencia sobre la probabilidad de detección. Como en el caso anterior, se opta por la situación 4 para la velocidad, manteniendo un ancho espectral fijo en 1 m/s, y se mide P_D en función de SNR en el rango de 5 a 20 dB.

En la Figura 3.12 se muestran los resultados de la simulación. El comportamiento es

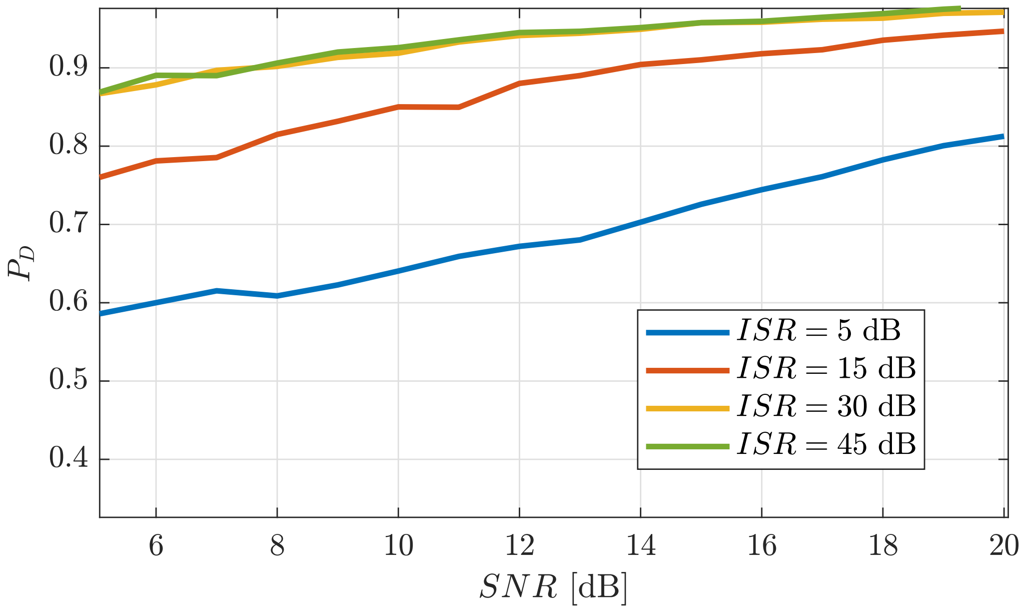


Figura 3.12: Probabilidad de detección en función de la SNR para diferentes valores de ISR, con v arbitraría y desconocida, y $\sigma = 1$ m/s.

análogo para las cuatro curvas, P_D crece a medida que la SNR aumenta. Sin embargo, para $ISR = 5$ dB la probabilidad de detección es significativamente menor que para el resto de los valores elegidos, para $ISR = 15$ dB P_D toma valores intermedios y para $ISR = 30$ dB e $ISR = 45$ dB la probabilidad de detección toma valores mayores y las curvas de P_D para estos valores de ISR se superponen. Estos resultados se corresponden con las probabilidades de salto en función de ISR presentadas en la Figura 2.13, donde se observa que los valores de 30 y 45 dB de ISR producen probabilidades de salto significativas (0,1 y 0,4 respectivamente) y lo contrario ocurre para los valores de 5 y 15 dB de ISR.

Comparación de P_D entre las cuatro situaciones de velocidad

En la última experiencia se consideran las cuatro situaciones de velocidad que se describieron: $v = 0$, conocida; $v = 0$, desconocida; v aleatoria, conocida; y v aleatoria, desconocida. Cuando la velocidad es aleatoria, para cada realización su valor se obtiene a partir de una variable aleatoria con distribución uniforme entre $-v_a$ y v_a. Además, se establecen $\sigma = 1$ m/s, $ISR = 30$ dB y se evalúa P_D en función de SNR, en el rango de 5 a 20 dB. Con esta simulación se prevé comparar la sensibilidad de la probabilidad de detección a las etapas de estimación de la velocidad empleando la mediana y de determinación de los umbrales, repitiendo lo que hizo para la P_{FA}.

En la Figura 3.13, se presentan los resultados. Se observa que las curvas no presentan diferencias significativas entre ellas, aunque varían ligeramente entre los casos de velocidad cero y velocidad aleatoria. Estos resultados indican que al igual que para la

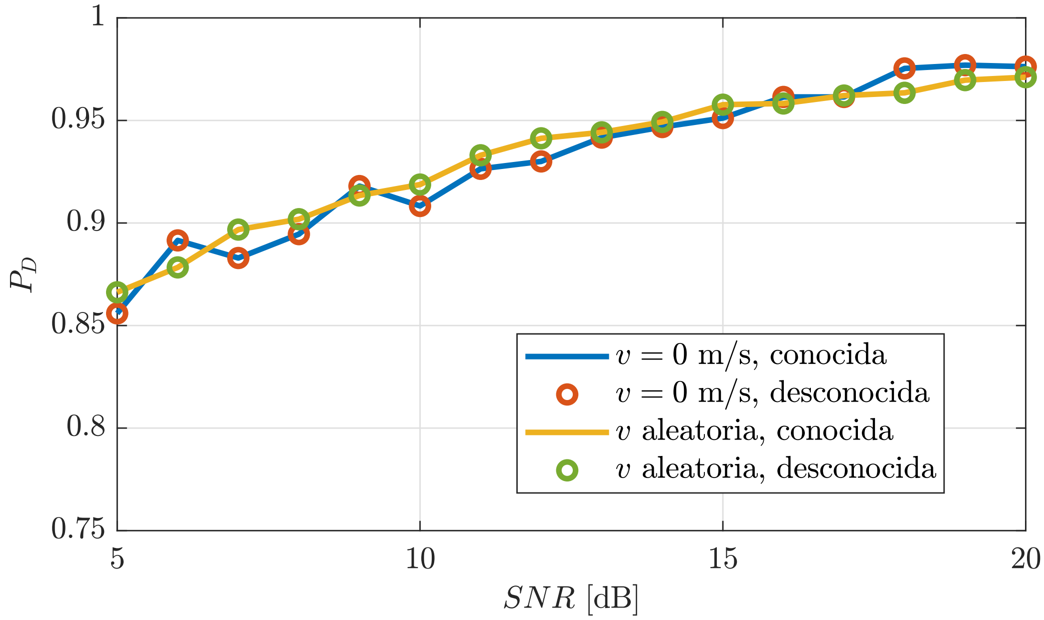


Figura 3.13: Probabilidad de detección en función de la SNR para diferentes situaciones de velocidad, con ancho espectral e ISR fijos en 1 m/s y 30 dB, respectivamente.

falsa alarma, en promedio la probabilidad de detección no se ve afectada por los errores que puedan existir en la estimación de la velocidad por medio de la mediana.

3.4. Conclusiones

En este capítulo se presentó el algoritmo de detección de interferencia wifi basado en el efecto de salto que la misma posee sobre los estimados de la velocidad Doppler media. Se describieron los pasos y se presentó un ejemplo de su funcionamiento.

En segundo lugar se estudió el desempeño del detector por medio de simulaciones numéricas que emplean datos sintéticos. Como métricas se utilizaron la probabilidad de falsa alarma y la probabilidad de detección. Se describieron las rutinas implementadas y luego se llevaron a cabo seis experiencias en torno a cuatro situaciones de velocidad y diferentes combinaciones de parámetros de interés, tales como ancho espectral, ISR y SNR.

Los resultados de las experiencias mostraron que tanto la probabilidad de falsa alarma como la probabilidad de detección en función de la SNR presentan el comportamiento esperado para un detector que emplea umbrales fijos. Por otra parte, la probabilidad de falsa alarma se manifestó sensible frente a la variación en el ancho espectral del objetivo meteorológico, mientras que la probabilidad de detección no se ve afectada por cambios en el ancho espectral.

Asimismo, en promedio, tanto P_D como P_{FA} no se ven afectadas por los errores que puedan existir en la estimación de la velocidad por medio de la mediana. Un

análisis más detallado de P_{FA} en función de la velocidad mostró que solo se presentan inconvenientes cuando la velocidad del hidrometeoro es v_a o $-v_a$.

Finalmente, se observó la variación de P_D con ISR. Los resultados muestran que cuando la ISR toma valores en los que la probabilidad de salto es apreciable, entonces la P_D es similar independientemente de ISR.

En resumen, se verificó que el detector de interferencia basado en saltos de velocidad Doppler es capaz de funcionar de manera efectiva ante distintas situaciones de velocidad, ancho espectral y con diferentes intensidades de interferencia.

Capítulo 4

Procesamiento de mediciones de radar meteorológico

Este capítulo comprende el procesamiento de mediciones de radar meteorológico con el fin de evaluar el desempeño del algortimo de detección de interferencia wifi propuesto en una situación realista de operación.

En primer lugar, se describen los conjuntos de datos utilizados. Con el objetivo de probar el detector con datos reales, pero dentro de las hipótesis que dieron lugar a su deducción, de un conjunto de datos se extraen señales compuestas de fenómeno meteorológico más ruido y de un segundo conjunto se extrae la interferencia wifi, proveniente de un registro en condiciones de aire claro. En segundo lugar se desarrolla un preprocesamiento de los datos, que implica la estimación del nivel de ruido promedio, la clasificación de los CPI que contienen fenómeno meteorológico y la identificación de tramas de datos wifi registradas.

Finalmente, se llevan a cabo dos pruebas de desempeño que involucran el uso de los datos reales. Una de ellas, consiste en una evaluación cuantitativa de las probabilidades de falsa alarma y de detección en función de la SNR, y de la ISR para P_D, que además son comparadas con resultados de simulaciones numéricas con datos sintéticos. La otra experiencia es del tipo cualitativo, y consiste en tomar un barrido de radar compuesto de fenómeno meteorológico, sumar interferencia wifi de un segundo conjunto de datos y pasar los datos resultantes por el algoritmo de detección tal como funcionaría en la práctica. Por último, con el fin de mitigar el efecto de la interferencia, en aquellos CPI en los que el detector establece que existe interferencia presente se reemplaza el estimado de velocidad Doppler inicial por el valor de la mediana de los estimados obtenidos con la ventana deslizante en el paso 1 del algoritmo.

(Biblioteca Leo Falicov CAB-IB)

Parámetro	**Valor**	
	RMA01	**RMA06**
Ubicación	Córdoba	Mar del Plata
Fecha	07/09/2018	28/06/2021
Frecuencia de portadora	5,625 GHz	5,625 GHz
Longitud de onda	5,36 cm	5,36 cm
PRI	1 ms	1 ms
Velocidad no ambigua	13,33 m/s	13,33 m/s
Nro. de pulsos por CPI	54	54
Ángulo de elevación	0,5°	1,5°
Condición meteorológica	Aire claro	Lluvia intensa

Tabla 4.1: Parámetros de las mediciones de radar meteorológico.

4.1. Mediciones de Radar Meteorológico Argentino

4.1.1. Características de las mediciones de radar

Para el procesamiento de los datos reales se utilizan mediciones adquiridas por los radares argentinos RMA, diseñados y fabricados por la empresa INVAP. Los mismos son radares meteorológicos polarimétricos que operan en banda C. Si bien estos radares poseen la capacidad de explotar la polarimetría de la señal, el trabajo propuesto tiene por objetivo el procesamiento Doppler de la señal, por lo que se utiliza únicamente el canal correspondiente a la polarización horizontal tanto para la onda transmitida como para la onda recibida, lo cual se suele denotar como polarización HH. A lo largo del capítulo se emplean mediciones correspondientes a dos radares RMA, correspondientes a dos barridos con PRI uniforme. Por un lado, se utiliza un barrido adquirido por el radar RMA01, emplazado en la ciudad de Córdoba, el día 7 de septiembre de 2018, cuya condición meteorológica es aire claro, es decir no existe fenómeno presente. Este conjunto de datos fue medido para una elevación baja en una zona densamente poblada y posee muchos pulsos afectados por interferencia wifi. Por otro lado, se utiliza un barrido registrado por el radar RMA06, ubicado en la ciudad de Mar del Plata, correspondiente a una tormenta de lluvia intensa del 28 de junio de 2021. Debido a la zona del radar y teniendo en cuenta que este conjunto de datos fue medido para una elevación mayor con respecto al anterior, no se aprecia influencia significativa de interferencia, ni de clutter terrestre. En la Tabla 4.1 se presenta la información resumida de las mediciones y los parámetros de configuración del radar.

En la Figura 4.1 se muestra el PPI de la potencia del conjunto de datos adquirido con el radar RMA06. Los valores intensos de potencia que se observan en la imagen

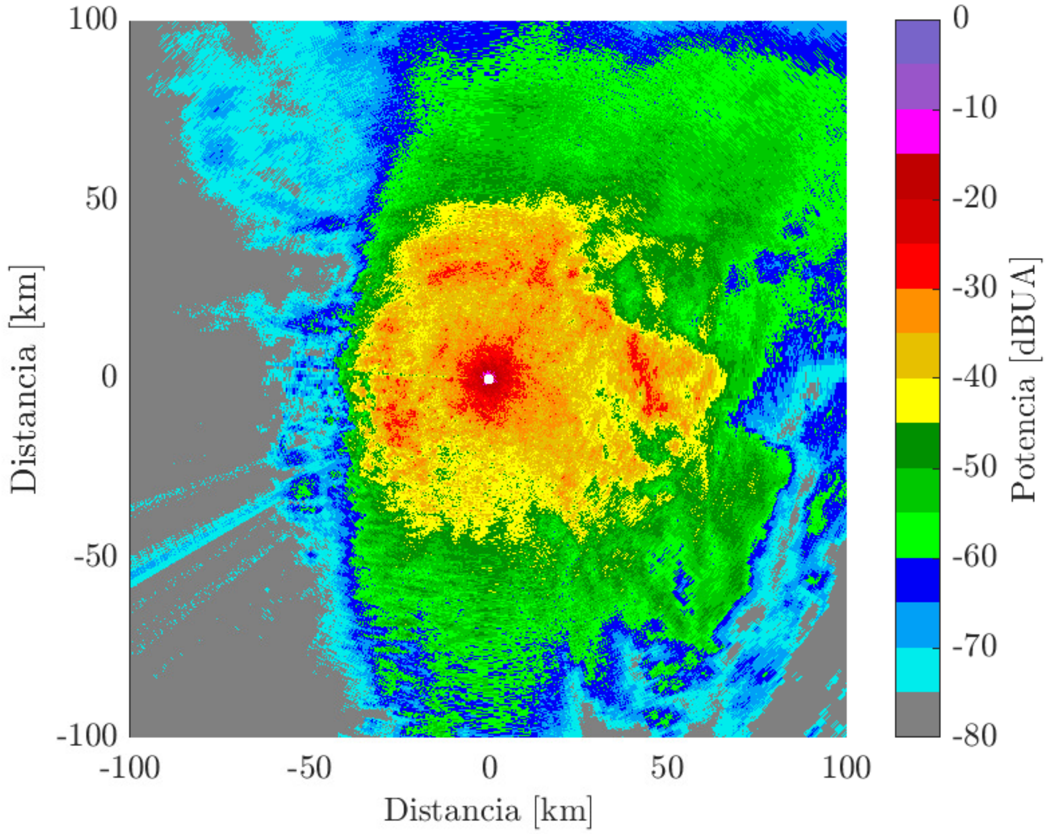


Figura 4.1: PPI de la potencia de la señal correspondiente al barrido del RMA06, del 28/06/2021 durante una lluvia intensa.

corresponden al hidrometeoro que se encuentra pasando por encima del radar. No se perciben contribuciones de clutter terrestre y solo unas pocas posiciones acimutales se encuentran afectadas por lo que puede ser interferencia, aquellas en que se observan las líneas radiales en alrededor de los 200°.

En la Figura 4.2 se presenta el PPI de la potencia del conjunto de datos adquirido con el radar RMA01. En este caso no existe objetivo meteorológico, los valores intensos de potencia que se manifiestan en las sierras cordobesas corresponden a clutter terrestre. Por otra parte, se observan numerosas líneas radiales que corresponden a comunicaciones wifi que son capturadas por el radar y que contaminan los registros de datos.

Es interesante analizar como se manifiesta la señal de interferencia wifi en la dimensión tiempo rápido o rango. En la Figura 4.3 se presenta un perfil de potencia en función de la distancia, correspondiente a uno de los pulsos interferidos del barrido del RMA01. Al comienzo del registro se observa una señal con una potencia de magnitud significativa, atribuible en gran parte a las reflexiones debidas a clutter. Seguidamente, la potencia de señal disminuye y se espera que baje su magnitud hasta el nivel de potencia de ruido, debido a que no existe fenómeno meteorológico presente. Sin embargo,

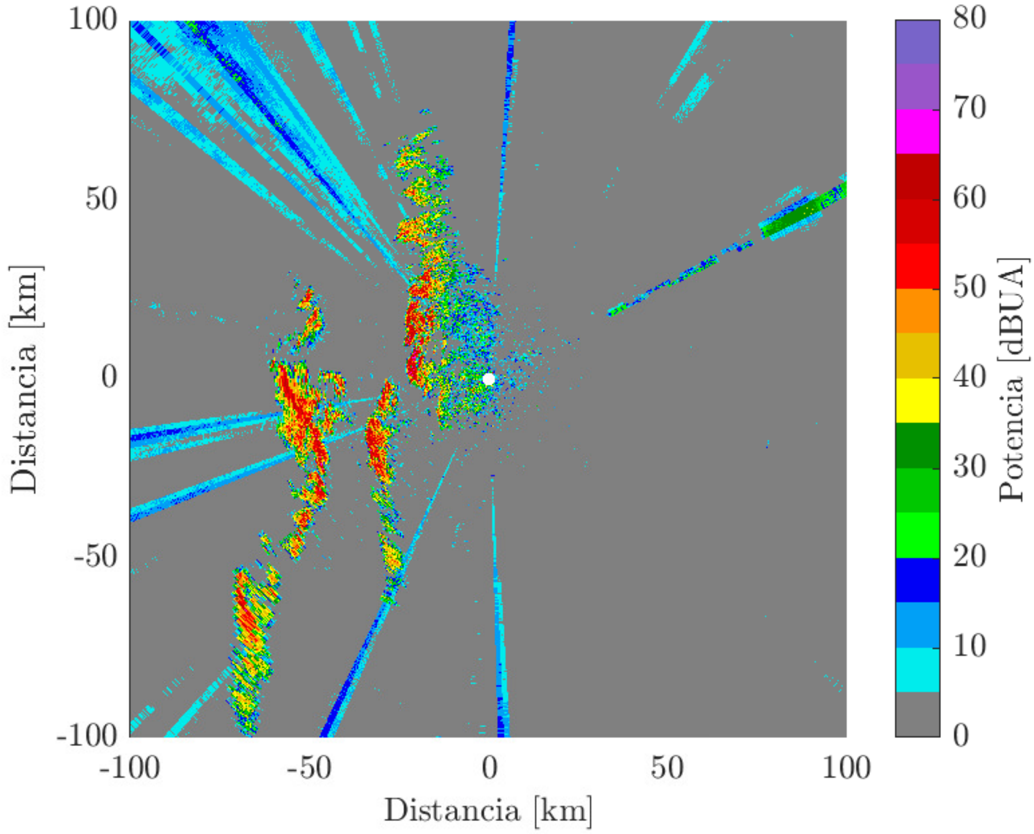


Figura 4.2: PPI de la potencia de la señal correspondiente al barrido del RMA01, del 07/09/2018 durante un día de aire claro.

para algunas distancias se observan regiones de magnitud elevada respecto al ruido, en torno a 70 km y 100 km que fueron resaltadas en color naranja y verde en la figura, lo cual es atribuible a la presencia de paquetes de wifi claramente identificables mediante una simple inspección visual.

Con los datos reales se prevé llevar a cabo una serie de experimentos controlados en los que se evalúe el desempeño del detector en una situación realista de operación. Para ello, se contempla por un lado extraer la señal correspondiente a interferencia wifi del barrido del RMA01 y por otro separar las muestras de señal que produce el objetivo meteorológico en el barrido del RMA06 y combinarlas. En primer lugar se desarrolla una experiencia cuantitativa, en la que se busca medir P_D y P_{FA}, y luego se hace una experiencia cualitativa en que se analizan visualmente PPI de velocidad. Para estas experiencias, el primer paso del preprocesamiento de los datos es hacer una clasificación de la señal correspondiente al barrido del RMA01 en la que se identifican paquetes wifi y se registran sus ubicaciones en términos de rango y acimut.

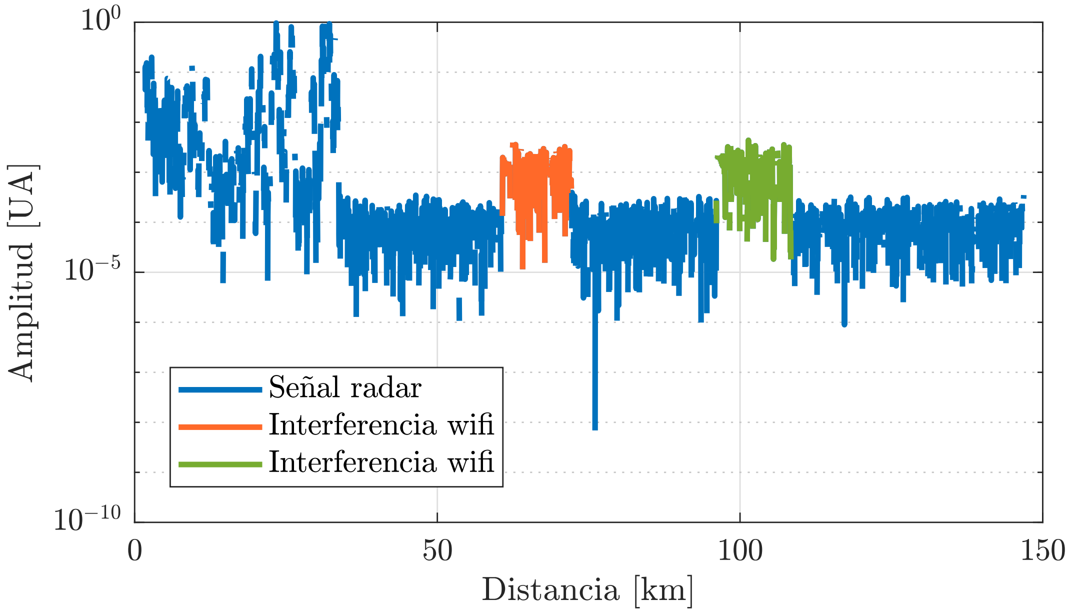


Figura 4.3: Perfil de potencia en función de la distancia para un pulso afectado por interferencia wifi del barrido correspondiente al RMA01.

4.1.2. Clasificación del objetivo meteorológico

El algoritmo de detección propuesto parte de la hipótesis de que la señal está conformada por contribuciones de fenómeno meteorológico, interferencia wifi y ruido. Por este motivo, si bien se lo busca poner a prueba con mediciones reales, se pretende que sea dentro de las condiciones de la hipótesis formulada.

Por lo tanto, es necesario identificar qué muestras del barrido del RMA06 corresponden a fenómeno meteorológico, a las que luego se les sumará las muestras de interferencia extraídas del barrido del RMA01, escalando su amplitud para obtener la ISR deseada. Para ello, se considerarán características propias para los tres primeros momentos espectrales para los objetivos meteorológicos. En las Figuras 4.4 y 4.5 se muestran los PPI de velocidad Doppler y de ancho espectral obtenidos mediante el algoritmo PPP [2].

Existen características propias de cada una de las componentes de la señal que se manifiestan en la potencia, la velocidad Doppler y el ancho espectral:

1. en relación con la potencia, valores bajos están asociados a ruido, mientras que valores medios y altos corresponden a fenómeno meteorológico o clutter terrestre;

2. las regiones del PPI de velocidad que presentan cierta homogeneidad, con una transición suave entre valores consecutivos (a excepción de superar el valor máximo de velocidad no ambigua) se correspondien a fenómeno meteorológico;

3. las regiones del PPI de velocidad que presentan valores que cambian rápido entre

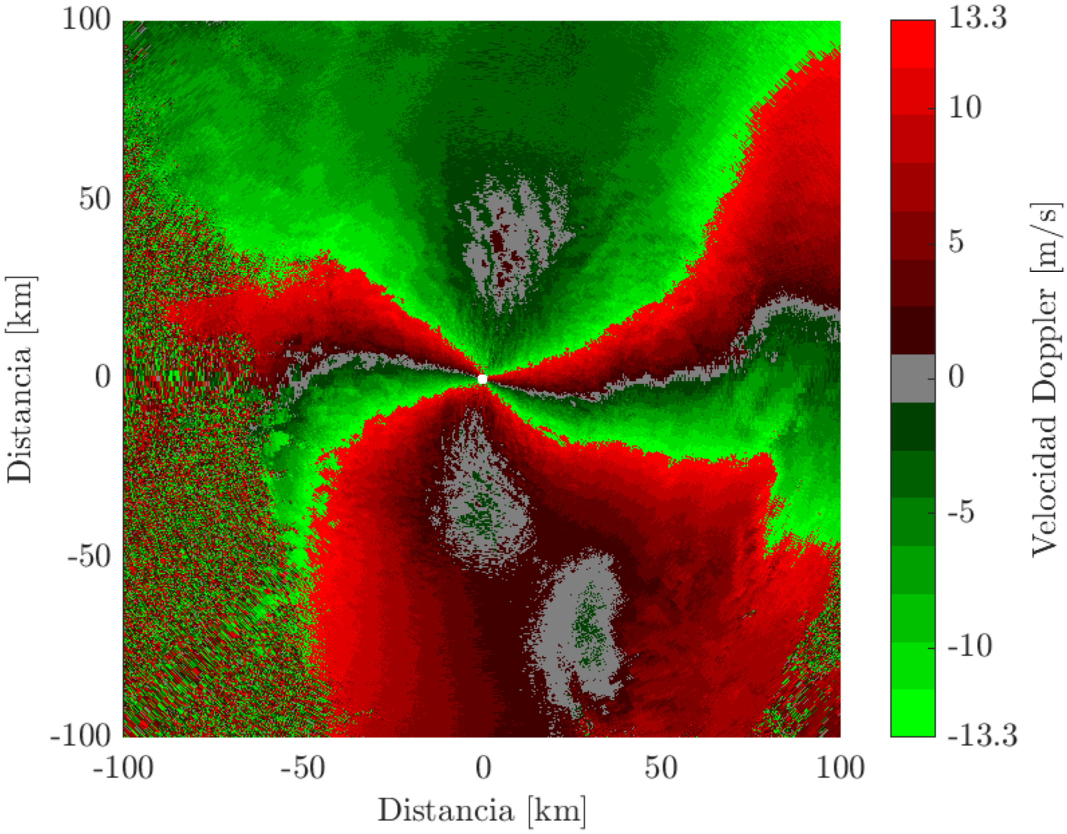


Figura 4.4: PPI de la velocidad Doppler de la señal correspondiente al barrido del RMA06, del 28/06/2021 durante una lluvia intensa.

celdas de rango y CPIs adyacentes, lo que parece un comportamiento aleatorio, se corresponden a ruido;

4. las regiones que corresponden a clutter terrestre tienen velocidad Doppler medio alrededor de 0 m/s;

5. las regiones que corresponden a clutter terrestre poseen valores bajos de ancho espectral, inferiores a 0,5 m/s;

6. las regiones que corresponden a ruido poseen anchos espectrales grandes, en este caso se considerará mayor a 5 m/s;

7. las regiones que corresponden a un hidrometeoro poseen anchos espectrales medios, para el tipo de fenómenos que se presentan en la Argentina.

Teniendo en cuenta las características para la velocidad, potencia y ancho espectral que se presenta, se identifica una región que se clasifica como compuesta únicamente de ruido y se calcula su promedio de potencia como una medida para estimar el nivel de ruido. El resultado de esta operación resulta en $-78{,}1$ dBUA.

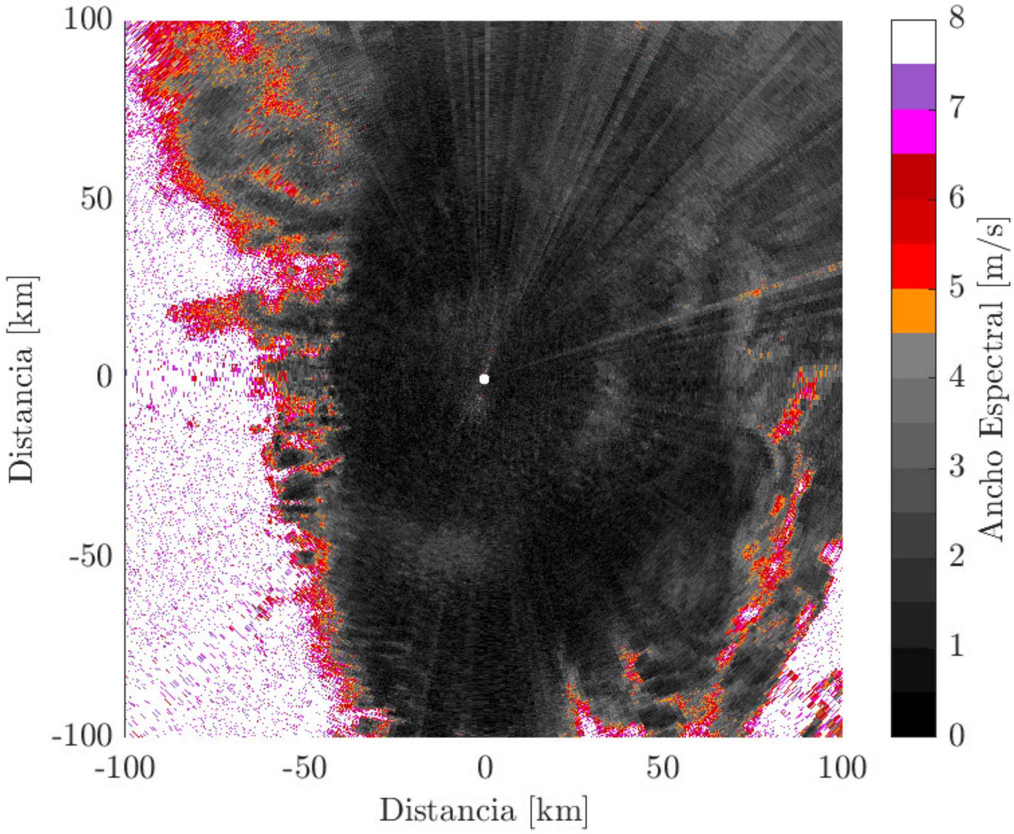


Figura 4.5: PPI del ancho espectral de la señal correspondiente al barrido del RMA06, del 28/06/2021 durante una lluvia intensa.

A continuación, se separan aquellos CPI cuyos anchos espectrales se encuentran en el rango entre 0,5 y 5 m/s. Teniendo en cuenta las características del registro de datos, se supone que estos CPI corresponden a contribuciones de la lluvia. Debido a que comprenden un rango amplio de anchos espectrales, se realiza el histograma que se muestra en la Figura 4.6 para clasificarlos. El histograma indica que el rango de valores de 0,5 a 1,5 m/s concentra la mayor cantidad de estimados de ancho espectral. Estos resultan ser de interés al momento de la evaluación del detector con los datos reales, ya que coinciden con los valores utilizados en simulaciones numéricas empleando datos sintéticos del capítulo previo.

Con el objetivo de seleccionar aquellos CPI correspondientes al fenómeno meteorológico para los experimentos, se crea una máscara que se aplica al barrido del RMA06, basada en los siguientes criterios:

- si bien no se aprecia la presencia de clutter terrestre, se conservan los anchos espectrales que resulten mayores a 0,5 m/s, favoreciendo la eliminación de blancos estáticos que puedan existir;
- se establece 1,5 m/s como límite superior para el ancho espectral, reteniendo

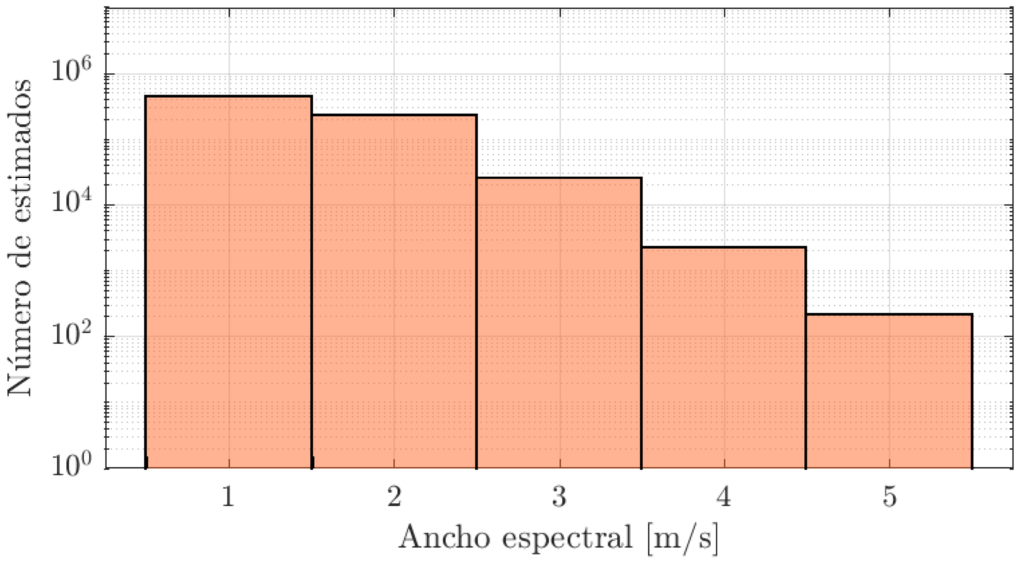


Figura 4.6: Histograma de los estimados del ancho espectral en el rango de valores de 0,5 a 5 m/s, del barrido correspondiente al RMA06.

valores similares a los utilizados en simulaciones numéricas previas y descartando posibles muestras de ruido;

- se consideran potencias mayores al nivel de ruido estimado.

Luego, se aplica la máscara y se retienen los CPI del barrido del RMA06 que corresponden al fenómeno meteorológico, los que resultan ser 528840. Un factor a tener en cuenta es que los CPI se corresponden a celdas de rango que se encuentran a distintas distancias e impactan en distintas regiones del fenómeno, por lo cual presentan una diversidad de potencias significativa debida a la diferente atenuación de la señal en la propagación y a la dispar reflectividad del hidometeoro. Entre los experimentos que se desea realizar se encuentran las mediciones de P_D y de P_{FA}, las cuales dependen de la SNR. Por este motivo, se realiza un histograma de la SNR estimada para los CPI que fueron clasificados como fenómeno meteorológico. La estimación de la SNR, $\widehat{SNR}$, se evalúa como

$$\widehat{SNR} = \frac{\hat{P}_z - \hat{N}}{\hat{N}}, \tag{4.1}$$

donde $\hat{N}$ es el nivel de ruido estimado y $\hat{P}_z$ es la potencia de señal en el CPI dada por

$$\hat{P}_z = \sum_{m=0}^{M-1} |z[m]|^2, \tag{4.2}$$

siendo $z[m] = z_I[m] + jz_Q[m]$ las muestras de la envolvente compleja de señal.

En la Figura 4.7 se muestra el histograma resultante. Se observa que los valores de SNR son muy elevados, la mayoría de los CPI poseen valores de SNR superiores a 20

dB. En caso de requerir valores de SNR más bajos, como 5 dB, será necesario ajustar la señal agregando ruido artificial a las muestras del fenómeno hasta lograr la SNR deseada.

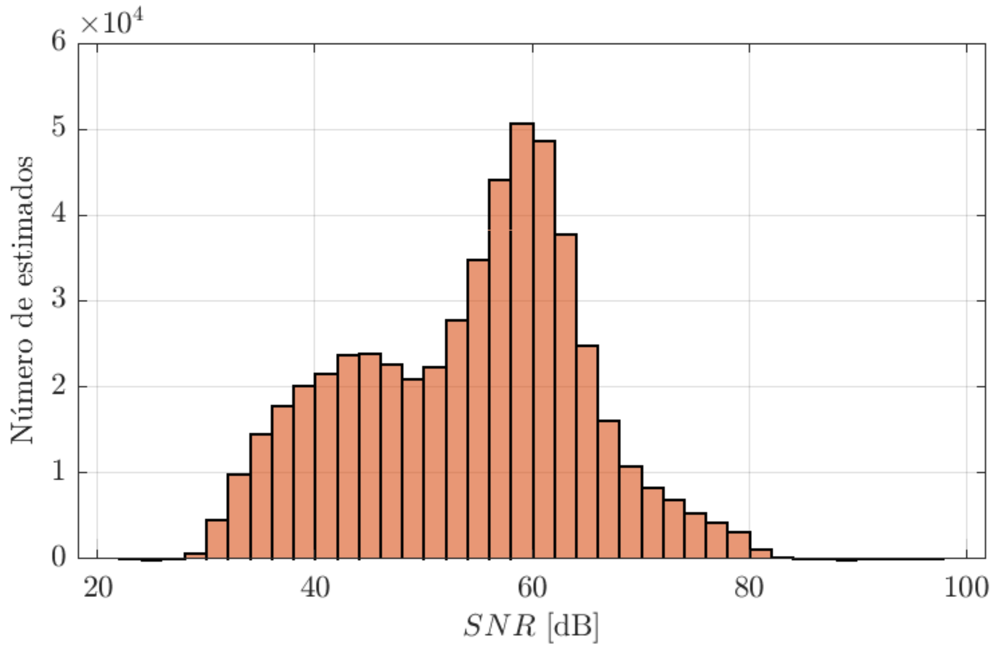


Figura 4.7: Histograma de los estimados de SNR para el subconjunto de CPI clasificado como fenómeno meteorológico, del barrido correspondiente al RMA06.

4.2. Análisis de desempeño del detector

Como primera experiencia con las mediciones reales de radar meteorológico se tiene contemplado repetir la estimación de P_{FA} y de P_D en función de la SNR, tal como se realizó en la Sección 3.3 a través de simulaciones numéricas con datos sintéticos.

4.2.1. Estimación de P_{FA} con las mediciones reales

Esencialmente, la rutina para la evaluación de P_{FA} coincide con los pasos descriptos a través del diagrama de flujo presentado en la Figura 3.6. La gran diferencia se encuentra en el dato de entrada. En este caso, cada vector se compone de 54 muestras correspondientes a cada uno de los CPI clasificados como fenómeno meteorológico del conjunto de datos del RMA06, cuyos anchos espectrales se encuentran comprendidos entre 0,5 y 1,5 m/s. Debido a que la P_{FA} se evaluará en función de la SNR, en cada CPI se mide la SNR y se le suma ruido ficticio, con distribución gaussiana, cuya varianza se ajusta para alcanzar el valor de SNR deseado. Con estos datos de entrada se evalúa la probabilidad de falsa alarma y este procedimiento se repite para los diferentes valores de SNR.

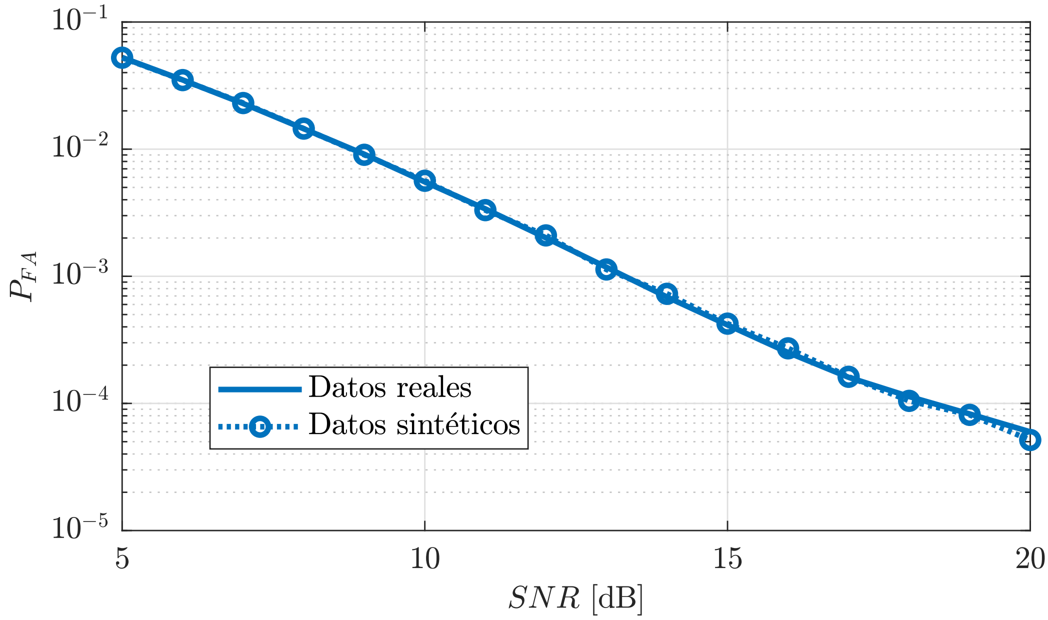


Figura 4.8: Probabilidad de falsa alarma en función de la SNR, con velocidad Doppler media entre $-v_a$ y v_a y ancho espectral entre 0,5 y 1,5 m/s.

Asimismo, se desea contrastar la estimación de P_{FA} con datos reales contra una simulación numérica obtenida a partir de la generación de datos sintéticos. Esto requiere reformar las simulaciones del Capítulo 3, debido a que ahora el ancho espectral no puede tomar un único valor fijo. Por lo tanto, se diseña una nueva serie se simulaciones en las que se considera que el ancho espectral es aleatorio, con distribución uniforme entre 0,5 y 1,5 m/s, con CPI de 54 muestras y velocidad Doppler media también aleatoria, con distribución uniforme entre $-v_a$ y v_a. A las contribuciones de fenómeno meteorológico se le suma ruido para obtener la SNR que se desea. Si bien el número de muestras en el CPI es menor al de los análisis del Capítulo 3, el largo de la ventana para obtener los estimados en el paso 1 del algoritmo de detección se mantiene en 8. Tanto con datos reales como sintéticos se cuentan hasta 5000 detecciones por cada punto de medición.

En la Figura 4.8 se muestran los resultados obtenidos de la estimación de P_{FA} tanto con datos reales como empleando los datos sintéticos. Con los datos reales, para aquellos valores de SNR que corresponden a una probabilidad menor a 10^{-4}, en pos de mejorar la estimación de P_{FA} se reutilizan los CPI cambiando la realización de ruido que se adiciona. De los resultados se observa que la curva de P_{FA} obtenida con los datos reales está prácticamente superpuesta a la producida con datos generados de forma sintética. Esto indica que el modelo planteado para la señal representa correctamente desde el punto de vista estadístico a las mediciones correspondientes al fenómeno meteorológico.

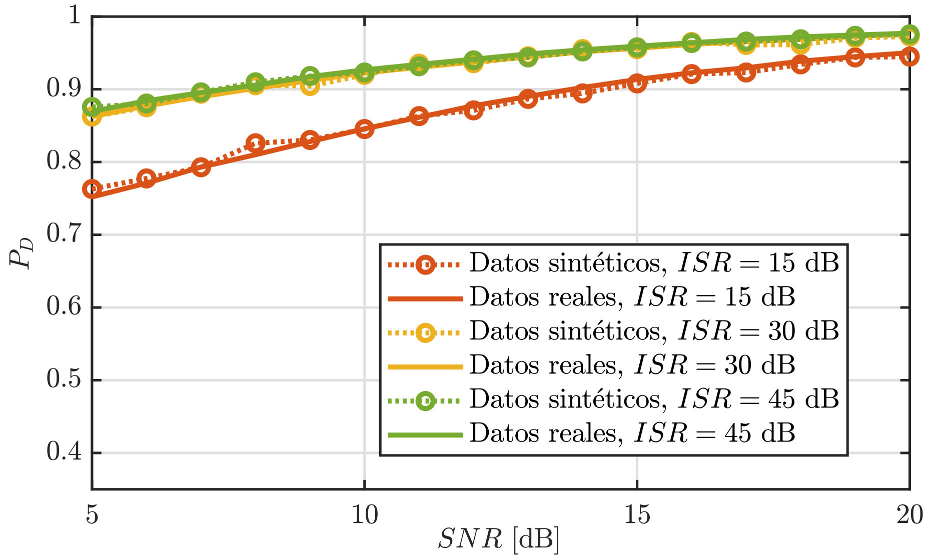


Figura 4.9: Probabilidad de detección en función de la SNR para diferentes valores de ISR, con velocidad Doppler media entre $-v_a$ y v_a y ancho espectral entre 0,5 y 1,5 m/s.

4.2.2. Estimación de P_D con las mediciones reales

Análogamente a lo que se describió para P_{FA}, la estimación de P_D empleando datos reales se puede explicar siguiendo el diagrama de flujo presentado en la Figura 3.7 con la modificación en el modo en que se ingresan los datos. En este caso las consideraciones respecto de los datos son iguales a las de la experiencia previa, con la salvedad de que ahora debe sumarse interferencia en algún pulso elegido de forma aleatoria. La interferencia que se suma se extrae del barrido correspondiente al RMA01, y antes de sumarla, se la escala de modo de obtener las ISR de 15, 30 y 45 dB que garantizan la manifestación de saltos de velocidad en la interferencia wifi, tal como indica la probabilidad de saltos presentada en la Figura 2.13.

En la Figura 4.9 se muestran los resultados obtenidos de la estimación de P_D tanto con datos reales como empleando los datos sintéticos. Al igual que para P_{FA}, las curvas de P_D presentan un comportamiento notablemente similar entre los casos de datos reales y los datos generados de forma sintética, lo que reafirma que el modelo estadístico representa bien a las mediciones reales.

4.3. Mitigación de interferencia wifi

Con el objetivo es mitigar la interferencia wifi, en esta sección se evalúa de manera cualitativa la implementación del detector aplicada a datos reales. A continuación se describe el procedimiento realizado.

1. Clasificación de los CPI correspondientes al hidrometeoro: tomando los datos reales del barrido correspondiente al radar RMA06 se aplica la

máscara para seleccionar aquellos CPI que contengan únicamente contribuciones del fenómeno meteorológico con anchos espectrales entre 0,5 y 5 m/s. Cabe aclarar que aquí se optó por tomar un mayor rango de valores de ancho espectral, de manera de incluir un mayor porcentaje del total de CPI en las gráficas, y que las mismas resultaran visualmente más "suaves".

2. Adición de interferencia: se separan los registros de interferencia identificados en el barrido correspondiente al RMA01 a partir de los niveles de potencia, se seleccionan posiciones acimutales del subconjunto de datos del RMA06 de manera aleatoria, se escalan los registros de interferencia en pos de garantizar una $ISR = 30$ dB y finalmente se suma la interferencia a las señal debida al fenómeno meteorológico.

3. Detección de interferencia: se utiliza el algoritmo de detección de interferencia propuesto sobre el conjunto de datos generado. La determinación de los umbrales se realiza de igual manera que como se presenta en el Capítulo 3, a una "distancia" $0{,}5v_a$ de la velocidad estimada.

4. Mitigación de la interferencia: los estimados de velocidad Doppler en aquellos CPI en lo que hubo paquetes wifi detectados se reemplazan por la mediana obtenida a partir de los estimados del paso 1 del algoritmo.

En la Figura 4.10 se presenta el PPI de velocidad Doppler correspondiente al fenómeno meteorológico con la interferencia wifi sumada. Este resultado se obtiene al estimar la velocidad utilizando PPP luego del segundo paso del procedimiento descrito al comienzo de está sección. Se aprecia claramente el efecto de la interferencia como líneas radiales de velocidades que cambian de valor rápidamente, rompiendo la homogeneidad que se observa en el PPI de velocidad Doppler de la Figura 4.4.

Luego de aplicar el tercer y cuarto paso del procedimiento se estima la velocidad Doppler media y se reemplaza el valor de estimación por la mediana obtenida a partir de los estimados del paso 1 del algoritmo en aquellos CPI en los que se detectó interferencia. El PPI de velocidad resultante se muestra en la Figura 4.11.

Observando las situaciones antes y después de realizar la detección y el reemplazo de los estimados, se observa que el detector logra identificar un gran número de paquetes wifi, lo que verifica el correcto funcionamiento del detector en términos cualitativos. Por otra parte, de la comparación de los PPI de velocidad de las Figuras 4.4 y 4.11 se ve que luego de mitigar el efecto de la interferencia se recupera el comportamiento homogéneo de la velocidad, pero que el resultado final presenta una menor calidad en términos de dispersión de los estimados. Esto es consecuencia de que la mediana se evalúa sobre estimados que fueron obtenidos empleando PPP con un total de 8 muestras lo que implica un error de estimación elevado.

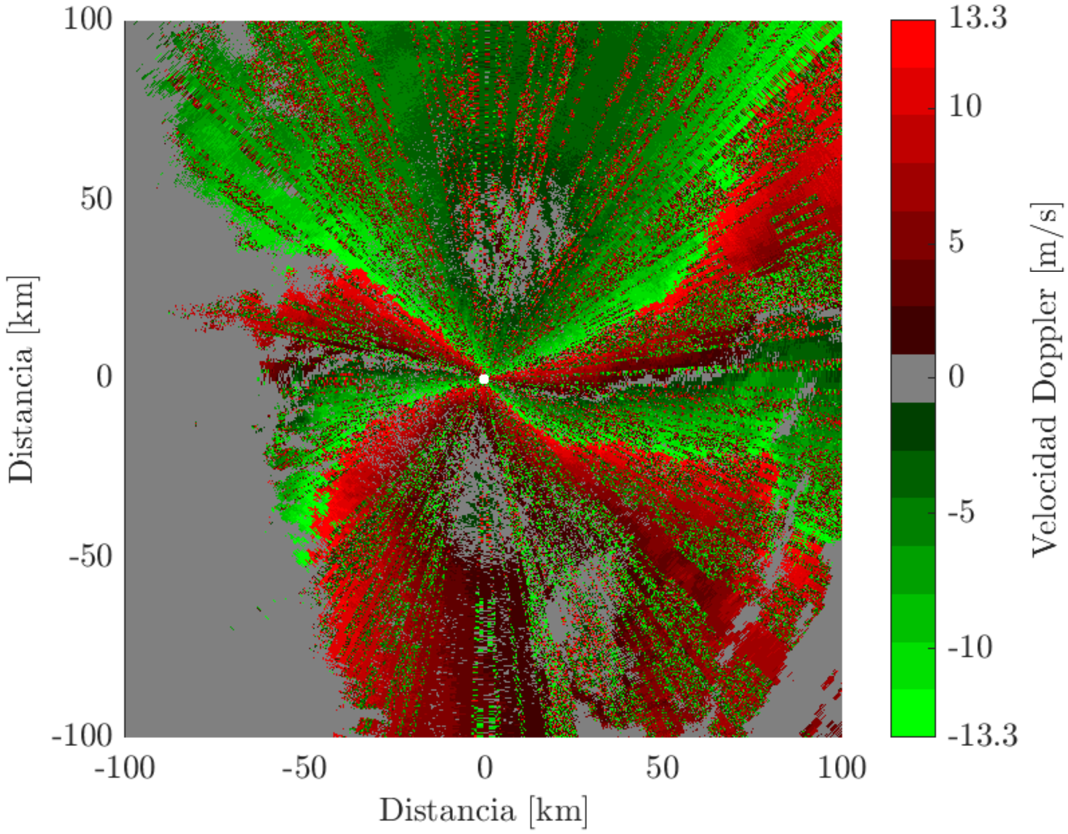


Figura 4.10: PPI de la velocidad Doppler correspondiente a los datos del RMA06 luego de sumar la interferencia wifi extraída del barrido del RMA01.

4.4. Conclusiones

En este capítulo, se llevó a cabo el procesamiento de mediciones de radar meteorológico con el objetivo de evaluar el desempeño del algoritmo de detección de interferencia wifi, que fue desarrollado en el Capítulo 3. En primer lugar, se describieron los conjuntos de datos utilizados, provenientes del radar RMA06 emplazado en Mar del Plata y del radar RMA01 ubicado en la ciudad de Córdoba. El barrido correspondiente al RMA06 se compone de fenómeno meteorológico, sin presencia aparente de clutter terrestre. El barrido del RMA01 se adquirió un día de aire claro y se encuentra fuertemente afectado por interferencia wifi propia del lugar en el que se encuentra emplazado.

Como parte del preprocesamiento de los datos, se estimó el nivel de ruido promedio, se realizó la clasificación de los CPI que contienen fenómeno meteorológico en el barrido del RMA06 sobre la base de los valores característicos que toman los momentos espectrales. Asimismo, se separaron tramas de datos wifi registradas por el RMA01 a partir de los perfiles de potencia de la señal en la dimensión tiempo rápido.

En cuanto a las pruebas de desempeño empleando las mediciones reales, se realizaron dos experimentos. El primero de ellos consistió en una evaluación cuantitativa de

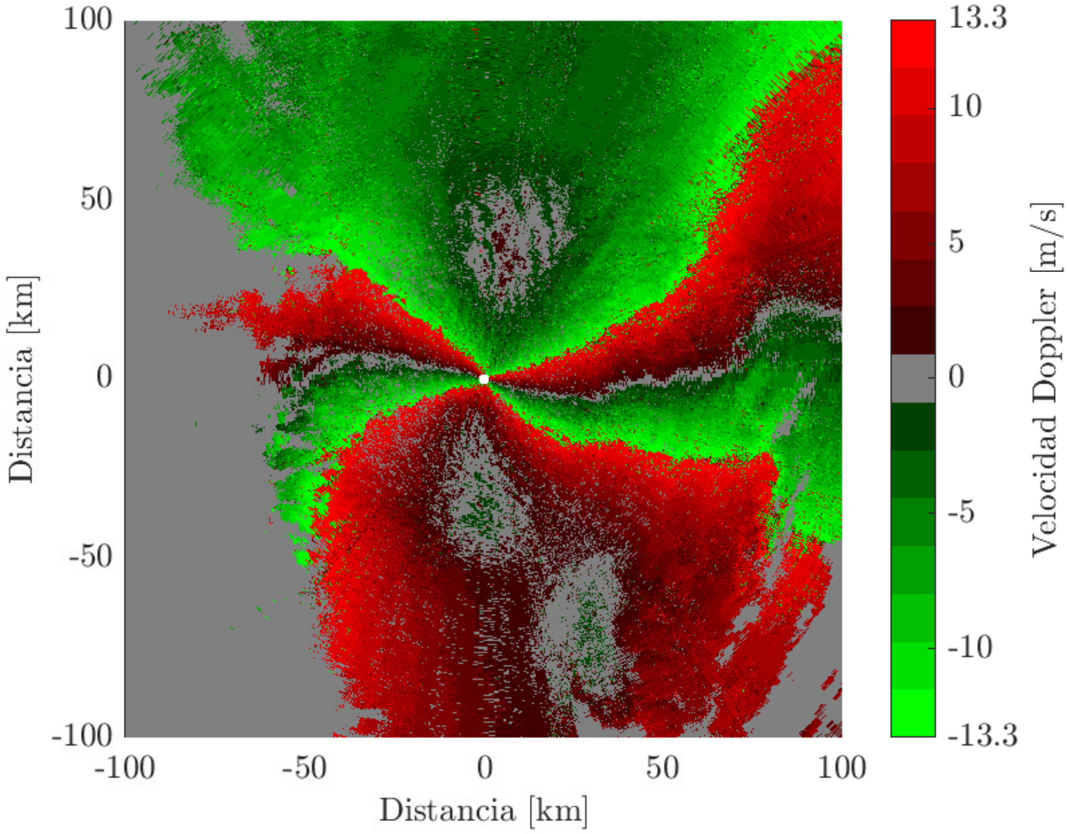


Figura 4.11: PPI de la velocidad Doppler obtenido luego de aplicar el algoritmo de detección y el paso de mitigación de la interferencia detectada.

las probabilidades de falsa alarma y de detección. Para ello se seleccionaron los CPI correspondiente al fenómeno con ancho espectral entre 0,5 y 1,5, se les sumó la interferencia wifi del otro conjunto de datos y se evaluó P_{FA} y P_D en función de la SNR, y de la ISR para P_D, siguiendo la lógica de las rutinas presentadas en la Sección 3.3.1. Con fines comparativos, en paralelo se repitió el calculo de P_{FA} y P_D en función de la SNR con datos sintéticos obtenidos a partir de seleccionar el ancho espectral y la velocidad Dopper de manera aleatoria, con distribuciones uniformes entre 0,5 y 1,5 m/s, y entre $-v_a$ y v_a, respectivamente.

Las curvas de P_{FA} y P_D obtenidas con datos reales y con datos sintéticos presentan una notable similitud entre sí, tanto en el comportamiento como en los valores que toman para cada SNR. Este resultado permite verificar el funcionamiento del detector predicho durante la deducción teórica.

Por último, la segunda experiencia consistió en tomar el barrido del RMA06, sumar la interferencia wifi del RMA01, escalada convenientemente para asegurar que $ISR = 30$ dB, y procesar los datos resultantes con el algoritmo de detección tal como funcionaría en la práctica. Con el fin de mitigar el efecto de la interferencia, en aquellos CPI en que el detector establece que existe interferencia presente se reemplaza

el estimado de velocidad Doppler inicial por el valor de la mediana de los estimados obtenidos con la ventana deslizante en el paso 1 del algoritmo. El análisis de los resultados es de índole cualitativa. Lo que se observa es que existe una mejora significativa en el producto de velocidad Doppler final con respecto al obtenido con la interferencia sumada. Sin embargo, también se pone de manifiesto la mayor dispersión que posee el estimado de la velocidad calculado a partir de la mediana.

Capítulo 5

Conclusiones

En esta tesis se abordó una técnica efectiva de detección automática y filtrado de la interferencia wifi a partir de su efecto sobre la velocidad Doppler en radar meteorológico.

En primer lugar, en el capítulo inicial, se dio a conocer el contexto de operación de los radares meteorológicos de Argentina y las limitaciones que le produce la problemática de la interferencia wifi y a modo de motivación se presentó como los productos de radar meteorológico son afectados la interferencia, como consecuencia de trabajar en la misma banda de operación y de que no se respetan las regulaciones vigentes.

En el segundo capítulo se estudió el efecto que la interferencia wifi posee sobre la estimación de la velocidad Doppler en aplicaciones de radar meteorológico. Para caracterizar el efecto de la interferencia sobre los estimados de velocidad, se llevó a cabo un estudio analítico considerando un modelo simplificado para el fenómeno meteorológico, y, posteriormente se implementaron simulaciones numéricas con un modelo de señal más realista.

Estos estudios arrojaron que el efecto de la interferencia sobre los estimados de velocidad se manifiesta como un salto de velocidad, que en el caso del modelo de señal simplificado tiene amplitud en módulo igual al valor de la velocidad ambigua. La aparición de estos saltos posee un comportamiento aleatorio, que depende de la ISR, el número de muestras en cada CPI y de las fases de las señales, teniendo en el caso más favorable (ISR alta y/o M pequeño) una tasa de ocurrencia del 50 %. A partir de las simulaciones se evaluó el sesgo y el error cuadrático medio de los estimados de velocidad y la probabilidad de salto de velocidad.

Los resultados mostraron que el ancho espectral del fenómeno también posee algún efecto sobre el salto de velocidad, haciéndolo más difuso a medida que éste se incrementa. Por ese motivo, fue necesario establecer un umbral para determinar qué se considera un salto de velocidad, en especial para anchos espectrales mayores. Se estimó la probabilidad de salto siguiendo dos criterios. El primero a través de una prueba de

gaussianidad basada en la curtosis de los estimados y el segundo consistió simplemente en fijar el umbral en la mitad del valor de la velocidad ambigua. Los resultados son similares para ambos enfoques. Por este motivo, debido a que la prueba de gaussiana es costosa computacionalmente y no funciona como se espera para valores de anchos espectrales mayores, se eligió tomar el umbral fijo para el resto del trabajo.

A partir del efecto de salto que produce la interferencia sobre los estimados de velocidad, en el tercer capítulo se propuso un algoritmo de detección, se expuso la idea del mismo, se detallaron los pasos de procesamiento que involucra y se presentó un ejemplo de su funcionamiento. Luego, se estudió el desempeño del detector por medio de simulaciones numéricas que emplean datos sintéticos. Como métricas se utilizaron la probabilidad de falsa alarma y la probabilidad de detección. Se describieron las rutinas implementadas y luego se llevaron a cabo seis experiencias en torno a cuatro situaciones de velocidad y diferentes combinaciones de parámetros de interés, tales como ancho espectral, ISR y SNR.

Los resultados de las experiencias mostraron que tanto la probabilidad de falsa alarma como la probabilidad de detección en función de la SNR presentan el comportamiento esperado para un detector que emplea umbrales fijos. Por otra parte, la probabilidad de falsa alarma se manifestó sensible frente a la variación en el ancho espectral del objetivo meteorológico, mientras que la probabilidad de detección no se vió afectada por cambios en el ancho espectral. Asimismo, en promedio, tanto P_D como P_{FA} no se vieron afectadas por los errores que puedan existir en la estimación de la velocidad por medio de la mediana. Finalmente, se observó la variación de P_D con ISR. Los resultados muestran que cuando la ISR toma valores en los que la probabilidad de salto es apreciable, entonces la P_D es similar independientemente de la ISR.

Finalmente, el capítulo cuatro se centró en evaluar el desempeño del detector de interferencia wifi mediante el procesamiento de mediciones de radar meteorológico. En la etapa de preprocesamiento de los datos, se estimó el nivel de ruido promedio, se realizó la clasificación de los CPI que contienen fenómeno meteorológico en un barrido de datos, sobre la base de los valores característicos que toman los momentos espectrales. Asimismo, se separaron tramas de datos wifi registradas en otro barrido a partir de los perfiles de potencia de la señal en la dimensión tiempo rápido.

Con las mediciones reales se realizaron dos pruebas de desempeño. Por un lado se evaluaron las probabilidades de falsa alarma y de detección. Para ello se seleccionaron los CPI correspondientes al fenómeno con ancho espectral entre 0,5 y 1,5, se les sumó la interferencia wifi del otro conjunto de datos y se evaluó la P_{FA} en función de la SNR y la P_D en función de la SNR y de la ISR. Los resultados fueron comparados con los de una simulación en la que se evaluó P_{FA} y P_D en función de la SNR con datos sintéticos que representen estadísticamente a las mediciones reales, se modelaron el ancho espectral y la velocidad Dopper como variables aleatorias con distribuciones

uniformes entre 0,5 y 1,5 m/s, y entre $-v_a$ y v_a, respectivamente. Las curvas de P_{FA} y P_D obtenidas con datos reales y con datos sintéticos presentan una notable similitud entre sí, tanto en el comportamiento como en los valores que toman para cada SNR. Este resultado permite verificar el funcionamiento del detector predicho durante la deducción teórica.

Por último, se llevó a cabo una experiencia cualitativa que pone al detector en una situación cercana a la de operación. Consistió en tomar los CPI clasificados como fenómeno meteorológico de un barrido, sumar la interferencia wifi de un segundo barrido, escalados convenientemente para asegurar que $ISR = 30$ dB, y pasar los datos resultantes por el algoritmo de detección tal como funcionaría en la práctica. Con el fin de mitigar el efecto de la interferencia, en aquellos CPI en los que el detector establece que existe interferencia presente se reemplazó el estimado de velocidad Doppler inicial por el valor de la mediana de los estimados obtenidos con la ventana deslizante en el paso 1 del algoritmo. Los resultado muestran que existe una mejora significativa en el producto de velocidad Doppler final con respecto al obtenido con la interferencia sumada. Sin embargo, también se pone de manifiesto la mayor dispersión que posee el estimado de la velocidad calculado a partir de la mediana.

5.1. Trabajos a Futuro

Existen diferentes líneas a indagar para darle continuidad al trabajo en el futuro. En relación directa con el problema abordado, una posibilidad es trabajar en la derivación de una prueba de decisión que conlleve la elección de los umbrales con un criterio de optimalidad.

Otro punto a estudiar con mayor detalle es con qué estimado de velocidad reemplazar el valor del estimado de velocidad en el que se a detectado interferencia. Cabe preguntarse si no será conveniente en lugar de trabajar sobre los productos meteorológicos como se hizo aquí, individualizar las muestras IQ contaminadas y llevar a cabo la mitigación a ese nivel de los datos.

Dado que el algoritmo de detección no sólo permite determinar si hubo o no interferencia, sino además determinar los posibles índices de las muestras en las que se ubicaría dicha interferencia, una mejora en la mitigación podría consistir en formular el estimador de PPP con todas las muestras del CPI salvo aquellas en las que podría existir interferencia.

Además, es importante extender las ideas propuestas a la detección y mitigación de la interferencia wifi en el modo de operación staggered (repetición de pulsos alternados) del radar.

Finalmente, también sería interesante llevar a cabo el estudio de cómo afecta la interferencia a otros productos de radar, ya sea los demás momentos espectrales o

bien las variables polarimétricas, y desarrollar un algoritmo de detección que tome la decisión considerando más de un estadístico.

Bibliografía

[1] Meischner, P. Weather Radar: Principles and Advanced Applications. Physics of Earth and Space Environments. Springer Berlin Heidelberg, 2013. 1

[2] Doviak, R. J., Zrnić, D. S. Doppler Radar and Weather Observations, 2nd Ed. San Diego Cal.: Academic Press, 1993. 1, 10, 13, 57

[3] INVAP. Radar meteorológico de banda c. https://www.invap.com.ar/areas/defensa-seguridad-y-ambiente/radar-meteorologico-banda-c/, Accedido el 23 de febrero de 2023. 1

[4] Ministerio de Obras Públicas de Argentina. Sinarame - sistema nacional de información sobre recursos hídricos. https://www.argentina.gob.ar/obras-publicas/hidricas/institucional/sinarame, Accedido el 23 de febrero de 2023. 1

[5] Saltikoff, E., Cho, J., Tristant, P., Huuskonen, A., Allmon, L., Cook, R., *et al.* The threat to weather radars by wireless technology. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **97** (7), 1159–1167, ago. 2016. 1

[6] ITU-R. Use of the bands 5150-5250 mhz, 5250-5350 mhz and 5470-5725 mhz by the mobile service for the implementation of wireless access systems including radio local area networks. En: The World Radiocommun. Conf. (WRC-03). Geneva, 2003. 2

[7] Saltikoff, E., Cho, J. Y. N., Tristant, P., Huuskonen, A., Allmon, L., Cook, R., *et al.* The threat to weather radars by wireless technology. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **97** (7), 1159–1167, 2016. 2, 5

[8] Zrnić, D. Estimation of spectral moments for weather echoes. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **17** (4), 113–128, oct. 1979. 2

[9] Ryzhkov, A., Zrnic, D. Radar Polarimetry for Weather Observations. Springer, 2019. 2

[10] Collado Rosell, A., Pascual, J. P., Areta, J. Adaptive spectral processing algorithm for staggered signals (aspass) in weather radars. *IET Radar, Sonar, Navigat.*, **14** (11), 1659–1670, nov. 2020. 2

[11] Lakshmanan, V., Zhang, J., Howard, K. A technique to censor biological echoes in radar reflectivity data. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **49** (3), 453–462, mar. 2010. 2

[12] Nai, F., Torres, S., Palmer, R. On the mitigation of wind turbine clutter for weather radars using range-Doppler spectral processing. *IET Radar Sonar Navig.*, **7** (2), 178–190, feb. 2013. 2

[13] Vaccarono, M., Chandrasekar, C. V., Bechini, R., Cremonini, R. Survey on electromagnetic interference in weather radars in northwestern italy. *Environments*, **6** (12), 2019. 2, 6

[14] Cho, J. A new radio frequency interference filter for weather radars. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **34**, 1393–1406, abr. 2017. 2

[15] Giovanardi, E., Cogo, J., Pablo Pascual, J. Medición de señales wlan/rlan que interfieren a los radares meteorológicos argentinos. En: 2022 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON), págs. 1–7. 2022. 5

[16] Correa, E., Cogo, J., Pablo Pascual, J. Degradaciön de los observables de radar meteorolögico debido a la interferencia wi-fi. En: 2022 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON), págs. 1–8. 2022. 5

[17] Leal, O. B., Rinalde, F., Cogo, J., Pascual, J. P. Wlan signal detection in weather radar data. En: 2021 XIX Workshop on Information Processing and Control (RPIC), págs. 1–6. 2021. 5

[18] IEEE Standard 802.11. SWireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications., 2016. 5

[19] Richards, M. A. Fundamentals of Radar Signal Processing. New York: McGraw-Hill, 2005. 5, 10, 11

[20] Cogo, J., Rosell, A. C., Areta, J. A., Pascual, J. P. Weather radar receiver identification for improving wi-fi interference detection. En: 2021 XIX Workshop on Information Processing and Control (RPIC), págs. 1–6. 2021. 5

[21] Petracca, G., Lugo, J. Mitigation of WLAN/RLAN interference in meteorological radar using wavelet filtering. En: XIV Reunión Trab. Proc. Inf. y Control (RPIC'17), págs. 1–6. Mar del Plata, Argentina, 2017. 5

[22] Joe, P., Scott, J., Sydor, J., ao, A. B., Yongacoglu, A. Radio local area network (rlan) and c-band weather radar interference studies. En: 32nd AMS Radar Conference on Radar Meteorology. Albuquerque, New Mexico, 2005. 6

[23] Rojas, L., Moisseev, D., Chandrasekar, V., Selzler, J., Keränen, R. Dual-polarization spectral filter for radio frequency interference suppression. En: 7th Eur. Conf. Radar Meteorol. Hydrol. (ERAD). Toulouse, France, 2012. 6

[24] Benoit, D., Cogo, J., Pascual, J. Análisis del efecto de la interferencia wifi sobre la velocidad doppler en radar meteorológico. En: ARGENCON 2022, Reunión Bianual de la Sección Argentina del IEEE. San Juan, Argentina, 2022. 6

[25] Kay, S. M. Fundamentals of Statistical Signal Processing, Estimation Theory. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1993. 16

[26] Janssen, L., Van Der Spek, G. A. The shape of Doppler spectra from precipitation. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, **AES-21** (2), 208–219, mar. 1985. 19

[27] Zrnić, D. Simulation of weatherlike Doppler spectra and signals. *J. Appl. Meteor.*, **14**, 619–620, ene. 1975. 20

[28] Corder, G. W., Foreman, D. I. Nonparametric statistics for non-statisticians. New Jersey: John Wiley & Sons, 2009. 24

Agradecimientos

En primer lugar, quisiera agradecer a mi familia, en especial a Norma, Adrian, Eric, Cinthia, Tamara y Lita, por su apoyo incondicional durante mi estadía en el Instituto Balseiro. Su amor, aliento y confianza en mí fueron fundamentales para llegar hasta aquí.

En segundo lugar, quiero agradecer a mis directores de tesis, Juan Pablo y Jorge, por su compromiso, guía y apoyo durante mi Maestría. No solo me enseñaron a pensar críticamente en el ámbito académico, sino también en la vida en general. Me siento afortunado de haber trabajado con ellos, y estoy seguro de que su influencia se verá reflejada en mis futuros logros.

Finalmente, quiero agradecer al equipo de docentes, al personal de alojamiento y a las autoridades del Instituto Balseiro, así como también a mis compañeros. Gracias por su apoyo y colaboración durante mi Maestría. Sus contribuciones y amistad hicieron que mi experiencia académica y personal fuera una aventura inolvidable.